



**Fábio André Barbosa Nascimento**

Licenciatura em Ciências de Engenharia Biomédica

## **Desenvolvimento de interface pessoa-máquina para geração de sensações tácteis**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador: Hugo Ferreira, Professor Auxiliar, DF – FC/UL

Co-orientador: José Luís Ferreira, Professor Auxiliar, DF – FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Forjaz Secca

Arguente: Prof. Doutor Daniel Gonçalves

Vogais: Prof. Doutor Hugo Ferreira

Prof. Doutor José Luís Ferreira



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Novembro 2013**



**Fábio André Barbosa Nascimento**

Licenciatura em Ciências de Engenharia Biomédica

**Desenvolvimento de interface pessoa-  
máquina para geração de sensações tácteis**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador: Hugo Ferreira, Professor Auxiliar, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Co-orientador: José Luís Ferreira, Professor Auxiliar, Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Constituição do júri

Presidente: Prof. Doutor Mário António Basto Forjaz Secca, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Prof. Doutor Daniel Jorge Viegas Gonçalves, Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

Vogal: Prof. Doutor Hugo Alexandre Teixeira Duarte Ferreira, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Vogal: Prof. Doutor José Luís Constantino Ferreira, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

**Novembro 2013**





Copyright©2013. Todos os direitos reservados. Fábio André Barbosa Nascimento, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Da minha aldeia vejo quanto da terra se pode ver no Universo...  
Por isso a minha aldeia é tão grande como outra terra qualquer  
Porque eu sou do tamanho do que vejo  
E não, do tamanho da minha altura...*

*Nas cidades a vida é mais pequena  
Que aqui na minha casa no cimo deste outeiro.  
Na cidade as grandes casas fecham a vista à chave,  
Escondem o horizonte, empurram o nosso olhar para longe  
de todo o céu,  
Tornam-nos pequenos porque nos tiram o que os nossos olhos  
nos podem dar,  
E tornam-nos pobres porque a nossa única riqueza é ver.*

*Alberto Caeiro*



## *Agradecimentos*

---

Este pequeno texto é o meu agradecimento público a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação e a todos aqueles que me acompanharam durante o meu percurso académico:

Ao Professor Hugo Ferreira, pela oportunidade que me proporcionou em desenvolver este tema de dissertação de mestrado no Instituto de Biofísica e Engenharia Biomédica, e ao Professor José Luís Ferreira, por toda a disponibilidade, simpatia e paciência que sempre demonstrou.

Ao Sr. Mesquita, responsável pelo laboratório de instrumentação, no qual passei largas horas, pela sua disponibilidade ajudando-me sempre que lhe pedi auxílio.

Ao César Rodrigues, grande companheiro, mas acima de tudo grande amigo que ao longo destes cinco anos me acompanhou nos bons e nos maus momentos, recordações que nunca esquecerei.

Aos meus colegas e amigos André Queirós, Gonçalo Mateus, João Carmo e Rémi Joaquim, por todo o apoio e partilha dos seus conhecimentos, ideias e sugestões que deram durante o desenvolvimento deste projecto. Aos meus amigos Ana Franco, André Morais, Carolina Guedes, Davide Anselmo, Diana Machado, Diogo Ribeiro, Gonçalo Cachola, Inês Santos, Joana Lobato, Luís Plácido, Luís Sousa, Ricardo Ribeiro, Rodrigo Caçorino, Rui Sousa, Sara Ferreira, Vítor Cardoso, que me acompanharam, pelos momentos de alegria e convívio, pela camaradagem e pelo apoio nos momentos difíceis.

À minha namorada, Marta, por toda a dedicação e carinho e por me fazer ver a luz ao fundo do túnel nos momentos mais difíceis.

E por último, e porque os últimos são os primeiros, ao meu irmão David, à minha mãe, Isabel, e ao meu pai, Carlos, pela paciência, pela coragem e força que me deram, por terem sempre uma palavra amiga e de incentivo que, mesmo à distância, me aconchega a alma. A eles também agradeço todo o seu esforço e sacrifício ao longo destes anos.

Obrigado a todos!



A presente dissertação de mestrado insere-se num projecto de desenvolvimento de um dispositivo para geração de sensações tácteis. Com o dispositivo desenvolvido é possível criar uma ligação entre o mundo real e um mundo virtual através da sensação táctil.

O dispositivo de reacção ao toque permite a interacção com objectos reais, adicionando sensações tácteis artificiais a qualquer superfície, permitindo também, por exemplo, a interacção com objectos que estejam a ser visualizados num ecrã táctil adequadamente adaptado. Através deste dispositivo é possível fazer com que um ecrã sensível ao toque se transforme num ecrã que transmite sensações, com o qual o utilizador pode interagir e sentir texturas. Ao contrário de outros dispositivos desenvolvidos noutros projectos, este dispositivo não requer a utilização de luvas ou qualquer outro tipo de vestuário com actuadores mecânicos.

O fenómeno por detrás do dispositivo táctil designa-se Electrovibração Inversa. O dispositivo injecta um sinal eléctrico fraco em qualquer parte do corpo do utilizador, criando um campo eléctrico oscilante na pele. O utilizador, ao deslizar a ponta do seu dedo sobre a superfície do objecto ou ecrã táctil, tem sensações tácteis que dependem do campo eléctrico envolvente. Aplicando sinais eléctricos adequados é possível produzir sensações tácteis semelhantes às que se obtém ao tocar em superfícies com diferentes texturas.

O dispositivo táctil dispõe de um microcontrolador onde se encontram guardados em memória várias formas de sinal, nomeadamente, sinal com a forma quadrada, triangular, dente de serra e sinusoidal. Através da variação das características dos sinais, tais como a forma, amplitude e frequência, é possível criar uma grande variedade de sensações tácteis.

Os resultados obtidos nos testes realizados foram bastante satisfatórios conseguindo-se obter uma boa a percepção táctil, isto é, várias sensações de texturas geradas por diferentes tipos de sinais.

Palavras-chave: Virtual, Táctil, Sensações, Texturas, Electrovibração Inversa.





*This dissertation is part of a project to develop a haptic device for generating tactile sensations. With the developed device it is possible to create a connection between the real world and a virtual world through the tactile sensation.*

*The haptic feedback device enables the interaction with real objects, adding artificial tactile sensations to any surface, and also, for example, allows interaction with objects that are being displayed on an adapted touch screen. Through this device one can turn touch screens into feel screens with which users can interact and feel textures. Unlike developed devices in other projects, this one does not require the use of gloves or any other wearing device that creates force feedback.*

*The device is based on the principle of reverse electrovibration that occurs when injecting a weak electrical signal in any part of the user's body, creating an oscillating electric field around the fingertips. In this way, the user can sense textures by sliding his fingertips over the surface of the object or touch screen. When applying appropriate electrical signals we can produce tactile sensations similar to those obtained by touching surfaces with different textures.*

*The tactile device has a microcontroller where signals with different shapes, namely square, triangular, sawtooth and sine waves, are stored in memory (flash). By varying the characteristics of the signal, such as the shape, amplitude and frequency, it is possible to create a wide variety of tactile sensations.*

*The results obtained in the tests were satisfactory, having succeeded in achieving good tactile perception, i.e. several texture sensations generated by different types of signals.*

*Keywords: Tactile, Virtual, Sensations, Textures, Reverse Electrovibration.*



## Índice

Agradecimentos .....	vii
Resumo .....	ix
Abstract .....	xi
Lista de figuras .....	xv
Lista de tabelas .....	xix
Siglas e acrónimos .....	xxi
Lista de símbolos .....	xxiii
1. Introdução .....	1
2. Sensações tácteis .....	3
2.1. O tacto .....	3
2.2. Gerar sensações tácteis .....	4
2.3. Electrovibração directa e Inversa .....	12
2.4. Impedância do corpo humano .....	14
2.5. Efeitos da corrente eléctrica no corpo humano .....	15
3. O dispositivo de reacção táctil .....	18
3.1. Circuito gerador de sinal .....	19
3.1.1. Microcontrolador .....	19
3.1.2. Programação do microcontrolador .....	21
3.1.3. Conversor digital-analógico .....	22
3.2. Elevador de tensão .....	23
3.3. Modelador de Tensão .....	25
3.4. Circuito do dispositivo táctil .....	26
3.5. Operação do dispositivo táctil .....	28
3.6. LED's de informação .....	29
3.7. <i>Design</i> e montagem do dispositivo táctil .....	30
3.8. Injecção de sinal .....	33
3.9. A "pele" dos objectos .....	34
3.10. Ligação à "Terra" .....	34
4. Resultados e discussão .....	35
4.1. Sensação táctil, forma e amplitude de sinal .....	36
4.2. Sensação táctil e frequência de sinal .....	36

4.3.	Sinal Quadrado .....	37
4.4.	Sinal Triangular .....	38
4.5.	Sinal Dente de Serra.....	39
4.6.	Sinal Sinusoidal .....	41
4.7.	Associação visual .....	42
4.8.	Electrovibração .....	43
4.9.	Testes de percepção táctil .....	43
5.	Conclusões e perspectivas .....	45
	Bibliografia.....	49

## *Lista de figuras*

---

Figura 2.1	Interface táctil da <i>Sandia National Laboratories</i> [1].	4
Figura 2.2	Interface táctil <i>Touch Master</i> , da EXOS, Inc. [2].	5
Figura 2.3	Interface táctil usada num <i>robot</i> para teleoperação, da Canadian Space e da Universidade de Ottawa [2].	5
Figura 2.4	a) Interface táctil de vibração da Universidade de Harvard; b) Interface táctil <i>The Telepac</i> , da Universidade de Salford [2].	6
Figura 2.5	Interface táctil <i>DataGlove</i> do IBM Research Center [2].	6
Figura 2.6	Interface táctil <i>CiberTouch</i> da Virtual Technologies Inc. [2].	7
Figura 2.7	Interface táctil do Laboratório de Hashimoto [2].	7
Figura 2.8	Interface táctil <i>FEELEX</i> [8].	8
Figura 2.9	Imagem de um jogo com uma interface de reacção táctil [10].	8
Figura 2.10	Jogo que transmite sensações de dor [2].	9
Figura 2.11	Dispositivo da Tactus Technology, Inc. a) Teclado QWERTY táctil; b) Superfície táctil (botões).	9
Figura 2.12	Força de Coulomb que se estabelece entre o dedo e uma superfície [13].	10
Figura 2.13	Dispositivo táctil <i>Feel Screen</i> da Senseg [13].	11
Figura 2.14	Protótipo de dispositivo de reacção táctil desenvolvido pela Nokia [14].	11
Figura 2.15	Electrovibração directa (à esquerda) e Electrovibração Inversa (à direita) [1].	13
Figura 2.16	Trajectos da corrente eléctrica no corpo humano [17].	14
Figura 2.17	Efeitos da corrente eléctrica no batimento cardíaco (ECG) e na Pressão Arterial [18].	16
Figura 3.1	Diagrama de blocos do dispositivo táctil.	18
Figura 3.2	Diagrama de blocos do Gerador de Sinal.	19
Figura 3.3	Placa de desenvolvimento Arduino Uno com microcontrolador Atmega328 [20].	20

Figura 3.4	Diagrama dos terminais de saída e entrada do microcontrolador Atmega328 [22].	21
Figura 3.5	Ambiente de desenvolvimento IDE da Arduino.	22
Figura 3.6	Circuito de conversão digital-analógico R-2R desenhado no programa Fritzing V 0.8.0 e fotografia das resistências R-2R montadas numa placa de prototipagem rápida.	23
Figura 3.7	Desenho simbólico do circuito de elevação de tensão baseado no circuito integrado MAX773 [25].	24
Figura 3.8	Elevador de tensão desenhado no programa <i>Fritzing</i> V 0.8.0.	25
Figura 3.9	Circuito de modelação da tensão desenhado no Fritzing V 0.8.0.	26
Figura 3.10	Esquemático electrónico do dispositivo desenhado no programa <i>Fritzing</i> V 0.8.0.	27
Figura 3.11	Montagem do dispositivo tátil. (1) Electrónica de controlo. (2) Microcontrolador (Arduino Uno). (3) Conversor digital-analógico. (4) LED's de informação. (5) Amplificação. (6) Elevador de Tensão.	28
Figura 3.12	Potenciómetros de controlo da frequência do sinal e da largura de pulso.	28
Figura 3.13	Interruptores de controlo.	28
Figura 3.14	Ajuste do ganho do sinal.	29
Figura 3.15	LED's de informação.	29
Figura 3.16	Logótipo do dispositivo tátil.	30
Figura 3.17	Vários aspectos do <i>design</i> do dispositivo tátil.	31
Figura 3.18	Placa de cobre (Cu).	31
Figura 3.19	Placa de vidro ITO.	32
Figura 3.20	Interação virtual através de uma placa de vidro ITO.	32
Figura 3.21	Injecção de sinal: através de pulseira (à esquerda) e por contacto directo com o dispositivo (à direita).	33
Figura 3.22	Injecção do sinal a partir de uma cadeira (à esquerda) e dum sapato (à direita) [1].	33
Figura 3.23	Saída da ligação à referência eléctrica do dispositivo tátil.	34
Figura 4.1	Percepção tátil utilizando frequências baixas (esquerda) ou médias (direita).	37

Figura 4.2	Representação simbólica de sensações transmitidas ao utilizador com a variação do PWM do sinal quadrado.....	38
Figura 4.3	Representação simbólica de sensações transmitidas quando é injectado um sinal triangular no utilizador. ....	39
Figura 4.4	Representação simbólica de sensações transmitidas quando é injectado um sinal dente de serra no utilizador.....	40
Figura 4.5	Representação simbólica de sensações transmitidas quando é injectada uma onda sinusoidal no utilizador. ....	41
Figura 4.6	Associação visual entre a imagem de uma textura e a sensação táctil produzida pelo dispositivo. ....	42
Figura 4.7	Execução experimental de testes de percepção táctil. ....	43
Figura 5.1	Sensação táctil sem necessidade de contacto com os objectos expostos [1]. ....	47
Figura 5.2	Orientações personalizadas em paredes para insuficientes visuais [28]. ....	47
Figura 5.3	Interação táctil numa parede [1]. ....	48





## *Lista de tabelas*

---

Tabela 2.1	Efeitos da corrente eléctrica no corpo humano [18]. .....	17
Tabela 3.1	Características do microcontrolador [21]. .....	20
Tabela 3.2	Descrição da informação representada pelos LED's. ....	29
Tabela 4.1	Texturas simuladas usadas nos testes de percepção.....	43
Tabela 4.2	Resultados do teste de percepção táctil efectuado a seis indivíduos. ....	44



## *Siglas e acrónimos*

---

Lista de siglas e acrónimos mais usados nesta dissertação.

AC	<i>Alternated Current</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
DAC	<i>Digital-to-Analogue Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
HAP-TAC	<i>Haptic Tactile</i>
IBM	<i>International Business Machines</i>
IDE	<i>Integrated Developement Environment</i>
ITO	<i>Indium Tin Oxide</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RA	Realidade Aumentada
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
RCA	<i>Radio Corporation of America</i>
REVEL	<i>Tactile Feedback Technology for Augmented Reality</i>
STM	<i>Scanning Tunneling Microscopy</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>



## *Lista de símbolos*

---

Lista dos símbolos usados com maior frequência nesta dissertação.

$V$	<i>Tensão</i>
$\epsilon_0$	<i>Constante de permissividade eléctrica do vácuo</i>
$\epsilon_s$	<i>Constante de permissividade eléctrica da pele</i>
$\epsilon_p$	<i>Constante de permissividade eléctrica do isolador</i>
$T_s$	<i>Espessura da pele</i>
$T_p$	<i>Espessura do isolador</i>
$A$	<i>Área de contacto</i>
$G$	<i>Ganho</i>



# 1. Introdução

O rápido desenvolvimento tecnológico nos países industrializados, a automação e a informatização do mundo real, que ocorreu na segunda metade do século XX, foram os principais responsáveis pelo desenvolvimento de interfaces que permitem interagir com o mundo virtual.

O objectivo deste documento é abordar o tema “Desenvolvimento de interface pessoa-máquina para geração de sensações tácteis” no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Biomédica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e relatar o desenvolvimento de uma interface que possibilita ao utilizador interagir com objectos reais e virtuais, como por exemplo em *touch screen*, *tablets* e/ou *smartphones*.

Há técnicas de realidade virtual que permitem já interagir com ambientes virtuais, em que, através de mecanismos de actuação mecânica, é possível gerar sensações tácteis como a rugosidade ou a rigidez de uma superfície. Neste projecto foi desenvolvido um dispositivo que tem por base a electrovibração inversa. A electrovibração inversa ocorre quando é injectada uma corrente no corpo do utilizador e este desliza um dedo sobre um objecto ou uma superfície como, por exemplo, um ecrã táctil devidamente adaptado. A electrovibração vai fazer com que o utilizador tenha uma percepção táctil que pode simular a existência de uma textura na superfície de toque. Através deste efeito é então possível que o utilizador tenha a percepção táctil de texturas de objectos que estejam a ser visualizados num ecrã de um equipamento táctil ou ainda de modificar a sensação de textura de objectos reais. As sensações são criadas artificialmente, permitindo assim que exista um "canal" de ligação entre o mundo real e o mundo virtual.

Actualmente dispomos já de equipamentos com ecrãs tácteis que estão fortemente implantados nos mercados internacionais e na vida das pessoas. No entanto, a inexistência de um teclado físico, por exemplo, causa alguma estranheza às sensações de um indivíduo que interaja com um destes equipamentos. Para tentar combater este facto foram adicionados mecanismos de vibração sensível ao toque que, no entanto, são aplicados a todo o aparelho e não no local específico onde ocorreu o toque. Com a electrovibração é possível simular a

sensação de vibração localizada que é impossível simular com o uso de unidades mecânicas de vibração ou mesmo com actuadores mecânicos localizados.

Ao longo do desenvolvimento deste equipamento foram tidos em conta alguns aspectos fundamentais, dos quais um dos mais importantes foi o custo do projecto, que se pretendeu manter o mais baixo possível sem pôr em causa a funcionalidade ou factores de segurança do mesmo.

O conceito de *feedback* tátil é muito recente e ainda pouco explorado mas com um enorme potencial. A Disney Research desenvolveu um dispositivo neste sentido designado por “*REVEL - Tactile Feedback Technology for Augmented Reality*” ainda sem perspectiva de inserção no mercado [1]. A *Toshiba*, através de um projecto em parceria com a *Senseg*, também desenvolveu um ecrã de toque com sensação tátil que consegue reproduzir texturas, cuja perspectiva de data de lançamento comercial é o ano de 2013. Com base no conceito da electrovibração a *Nokia* também desenvolveu um protótipo de um *smartphone* o N900 que permite sentir a textura dos ícones no ecrã.

No capítulo dois é feito um enquadramento histórico do desenvolvimento de dispositivos de geração de sensações tácteis, desde os primeiros protótipos até aos mais recentes, descrevendo sumariamente as técnicas aplicadas. No terceiro capítulo são descritas as várias fases de planeamento, projecto, construção e montagem de um dispositivo baseado na electrovibração. No capítulo quatro são descritos os resultados obtidos através dos testes realizados após o que, no quinto capítulo, são enunciadas as principais conclusões e perspectivas de aplicações para o dispositivo desenvolvido.

Este projecto foi desenvolvido numa perspectiva universal de forma a abrir a possibilidade de introduzir um dispositivo gerador de sensações tácteis no mercado e espera-se poder perspectivar aplicações para diversas áreas como a engenharia, a medicina e o *marketing*.



## 2. Sensações tácteis

Os sentidos são muito importantes para o ser humano. Através deles é possível sentir e interagir com o mundo. Os órgãos sensoriais captam informações que são enviadas através de terminações neuronais para os córtices sensoriais da visão, da audição, do paladar, do olfacto e do tacto. São os sentidos que nos possibilitam ter a percepção do mundo.

### 2.1. O tacto

O tacto é o órgão sensorial mais activo, sendo também o primeiro a estruturar-se na vida pré-natal. É através dele que sentimos um aperto de mão e as texturas de tudo o que nos rodeia. O corpo humano é constituído por inúmeros receptores tácteis que permitem sentir quer os efeitos da temperatura quer a sensação de dor. A dor é muito útil para informar o cérebro sobre o risco de eventuais lesões no corpo, e tem um impacto muito grande sobre as emoções, estando sujeita a um controlo rigoroso por parte do corpo humano. A capacidade de discriminação sensorial é variável na superfície do corpo, sendo especialmente mais intensa em locais como as pontas dos dedos. A exploração táctil é muito importante, e é feita em interacção funcional com o sistema motor.

A curiosidade em conhecer, mexer e interagir com objectos é característica de qualquer espécie animal e, principalmente, do ser humano. Daí vem este interesse em interagir de uma forma como até aqui nunca foi possível, tanto com objectos reais como com objectos virtuais.

A háptica é a ciência do toque, dedicada a estudar e a simular a pressão, a textura, a vibração, entre outras sensações biológicas relacionadas com o toque. A indústria de dispositivos móveis tem integrado a resposta háptica através de sensações por vibração. Com o desenvolvimento desta área é cada vez mais possível integrar uma grande variedade de estímulos tácteis que chegam ao utilizador. Para que a interacção táctil seja mais realista, o desenvolvimento de novas interfaces tácteis para dispositivos móveis deve ser baseado não apenas nos aspectos técnicos mas também na percepção humana e na funcionalidade [2].

A partir de 1990 existe uma quantidade significativa de publicações sobre reacção tátil em interfaces pessoa-máquina, especialmente em áreas como a teleoperação, telepresença, superfícies 3D, sistemas de Braille e em jogos [2].

O sentido háptico do ser humano é composto pelo sentido cinestésico, relacionado com a força e o movimento e pelo sentido tátil, sendo este associado ao toque, e portanto mais importante para o desenvolvimento do tema deste trabalho.

O dispositivo tátil desenvolvido é uma interface pessoa-máquina que consegue reproduzir de forma realista sensações semelhantes às que se obtêm em superfícies de diferentes texturas. De um ponto de vista tecnológico a estimulação tátil pode ser vista de duas formas diferentes. Uma delas será através da utilização de tecnologias de ambiente virtuais para insuficientes visuais, inspiradas em impressoras matriciais e em sistemas de Braille. Uma outra abordagem é baseada em tecnologias electromagnéticas. Na literatura encontram-se trabalhos em que se aplicam estímulos tácteis nas mãos e nos dedos dos utilizadores, mas o mais comum é fazerem-no através de actuadores vibratórios. As técnicas de realidade virtual possibilitam a interacção em ambientes sintéticos, isto é, virtuais, aos quais se pode, agora, acrescentar o sentido tátil [2].

## 2.2. Gerar sensações tácteis

Nos últimos anos foram desenvolvidos vários trabalhos que, com diferentes abordagens, permitiram produzir vários equipamentos para produzir sensações tácteis artificiais.

O investigador Dave Andaleon, do Sandia National Laboratories, conduziu um projecto de dispositivos tácteis que permitem a interacção com o dedo para aplicações em ambientes virtuais. O *software* desenvolvido para apoiar o sistema de interface tátil permite que ecrãs tácteis possam ser manuseados com o dedo polegar, com o dedo indicador, com o médio, e/ou com a palma da mão (ver Figura 2.1).

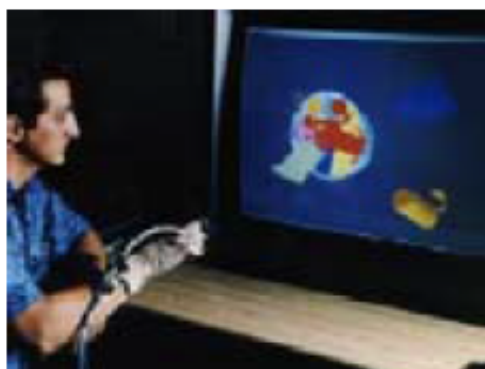


Figura 2.1 Interface tátil da *Sandia National Laboratories* [1].

A interface tátil consiste numa matriz 2 x 3 actuadores electromagnéticos, montados numa estrutura que posteriormente é presa à mão do utilizador. Os actuadores são elementos que produzem movimento. Cada actuador opera na faixa de frequência de 8 a 100 Hz, é capaz

de actuar com um recuo de 762  $\mu\text{m}$  e funciona com uma pressão máxima de 1.2  $\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$  [2][3][4]. Especificamente, o objectivo do investigador Dave Andaleon com este trabalho foi o desenvolvimento de uma matriz de alta densidade táctil compatível com dispositivos padrão com vista a ser integrada em ambientes virtuais.

Os investigadores da Exos desenvolveram uma interface táctil, o *Touchmaster* (ver Figura 2.2), que permite a estimulação de todos os dedos. Os actuadores utilizados nesta interface são electromagnéticos do tipo bobina de voz. Estes dão um *feedback* "vibro táctil" a uma frequência de cerca de 210-240Hz, com amplitude constante [2][3].



Figura 2.2 Interface táctil *Touch Master*, da EXOS, Inc. [2].

Num projecto em parceria entre a Universidade de Ottawa e a agência Canadian Space, Petriu e McMath desenvolveram um dispositivo de sensores tácteis utilizado num *robot*. O estimulador táctil é composto por agulhas de vibração, isto é, uma matriz de  $8 \times 8$  cabeças electromagnéticas numa superfície de 6,5 centímetros quadrados (ver Figura 2.3) [2][3][5].

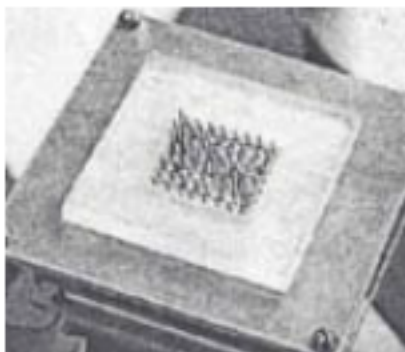


Figura 2.3 Interface táctil usada num *robot* para teleoperação, da Canadian Space e da Universidade de Ottawa [2].

No Laboratório Amstrong, Chris Hasser estudou as características de percepção táctil e através da reacção táctil da interface pretendia desenvolver aplicações na área da robótica. O desenvolvimento deste projecto resultou numa interface táctil de um dispositivo conhecido como HAP-TAC, *Haptic Tactile*, que foi utilizado num sistema que permite dar uma resposta táctil a pessoas com insuficiência visual [2][3].

Uma das áreas de investigação da Harvard University, do Departamento de Ciências Aplicadas, é a teleoperação e, durante vários anos, um grupo de investigadores liderados por

Robert Howe procuraram desenvolver dispositivos com ecrãs tácteis dotando-os de capacidade de reacção táctil (ver Figura 2.4a) [2][3].

Os investigadores da University de Salford desenvolveram uma interface que consiste numa luva táctil que possibilita a percepção da temperatura e da pressão. As posições dos dedos são determinadas através de sensores que se baseiam no Efeito de Hall. Esta interface é composta por um disco de cerâmica de PZT (titanato zirconato de chumbo) com diâmetro de 10 mm e espessura de 1 mm (ver Figura 2.4b). Este *feedback* é transmitido para trinta locais nas superfícies anteriores dos dedos e da palma de uma mão. O objectivo dos pesquisadores foi criar uma sensação eficaz de interacção com objectos virtuais [2].



a)



b)

Figura 2.4 a) Interface táctil de vibração da Universidade de Harvard; b) Interface táctil *The Telepac*, da Universidade de Salford [2].

Na Figura 2.5 está representada uma luva, a *DataGlove*, que permite reconhecer os movimentos da mão do utilizador. A luva é composta por 14 sensores que medem a curvatura dos dedos, associando actuadores piezocerâmicos em cada um destes. Este projecto foi inicialmente desenvolvido pela VPL [6] e a luva foi modificada mais tarde por Zimmerman, do centro de investigação Almaden da IBM's Research Center [2].



Figura 2.5 Interface táctil *DataGlove* do IBM Research Center [2].

O investigador Begej, do Centro Espacial Johnson da NASA, desenvolveu uma interface tátil em grande escala com 512 actuadores que podem ser usados sobre o tronco, membros inferiores e superiores. Esta empresa também desenvolveu uma luva que permite uma reacção tátil através de um mecanismo de exosqueleto [2][3].

Em 1995, a empresa Virtual Technologies Inc, propôs o *CyberTouch* (ver Figura 2.6), que gera uma reacção tátil associada à *CyberGlove* e pode ser usada em muitas aplicações. Os actuadores tácteis são colocados em cada extremidade do dedo e na palma da mão para fornecer impulsos e vibrações [2][3].

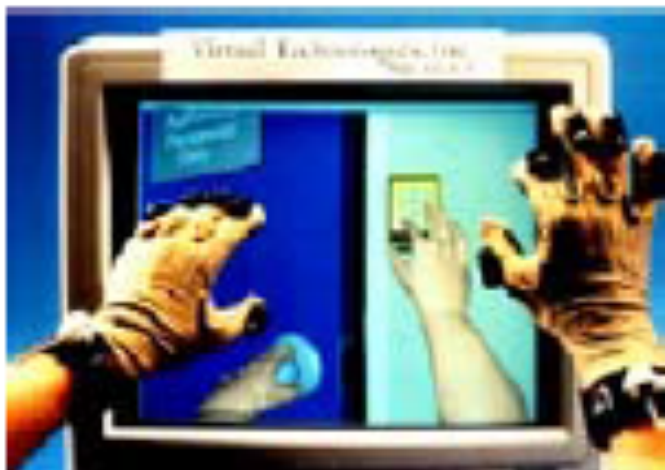


Figura 2.6 Interface tátil *CyberTouch* da Virtual Technologies Inc. [2].

Na Figura 2.7 está representada uma interface desenvolvida por investigadores do Instituto de Ciência Industrial da Universidade de Tóquio, no Laboratório de Hashimoto. Através de técnicas microscópicas STM (*Scanning Tunneling Microscopy*) e AFM (*Atomic Force Microscopy*) desenvolveram um sistema que permite explorar superfícies à nano-escala, bem como permitem ao utilizador sentir rugosidade nesta mesma escala [2].



Figura 2.7 Interface tátil do Laboratório de Hashimoto [2].

Para ambientes de realidade aumentada, a abordagem mais comum é a que utiliza os tradicionais actuadores mecânicos, tais como o *Phantom™*, para fornecer uma reacção táctil de objectos virtuais registados no mundo real [7]. Embora esta abordagem seja importante para aplicações médicas, tais como simuladores, requer instrumentação e ambientes com aparelhos complexos e a mobilidade dos utilizadores fica limitada em espaços de trabalho pequenos.

As tecnologias dedicadas a aplicações médicas, como a electroestimulação táctil e neuromuscular ainda não são muito utilizadas devido à sua natureza invasiva, no entanto existem algumas já utilizadas em hospitais [8].

O FEELEX, representado na Figura 2.8, é um dispositivo que utiliza uma matriz de pinos situados por baixo de uma superfície flexível e quando um objecto virtual é projectado sobre a superfície, os pinos deslocam-se para cima e para baixo, deslocando também o substrato flexível criando uma forma física dimensional alinhada com uma imagem projectada que pode ser sentida pela mão do operador [9].



Figura 2.8 Interface táctil *FEELEX* [8].

O *feedback* táctil também pode ser usado para jogos, tornando-os mais empolgantes e atractivos. A Figura 2.9 ilustra um exemplo de um ambiente de jogo que simula múltiplos sinais tácteis como a sensação de dureza das superfícies [10].



Figura 2.9 Imagem de um jogo com uma interface de reacção táctil [10].

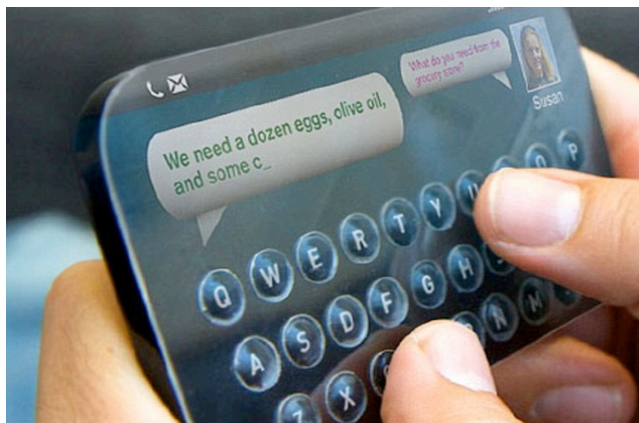


Um grupo de investigadores alemães, da Academy of Media Arts of Cologne, desenvolveu um jogo que produz uma resposta tátil através de sensações de dor a nível térmico e mecânico (ver Figura 2.10) [2].

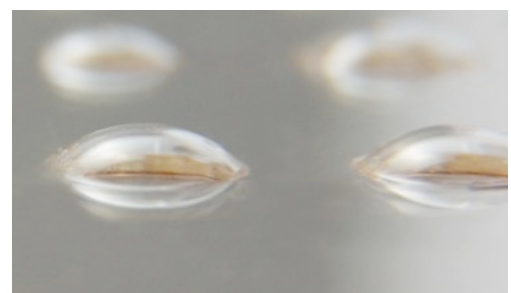


Figura 2.10 Jogo que transmite sensações de dor [2].

Recentemente, foi desenvolvida uma nova interface tátil pela Tactus Technology, Inc., Fremont, CA., designada *Tactus Tactil Layer<sup>TM</sup>*. Esta tecnologia fornece uma nova dimensão de interface ao utilizador, fazendo com que surjam botões totalmente transparentes num ecrã sensível ao toque. Quando esta camada tátil de botões se encontra desactivada fica plana e invisível, tornando-se imperceptível ao utilizador. Ao activar a camada tátil, os botões ganham forma tridimensional com uma altura, forma e firmeza específicas, permitindo ao utilizador interagir mais facilmente com o dispositivo. Estes botões podem ser usados para criar, por exemplo, um teclado QWERTY (ver Figura 2.11a) sobre um ecrã tátil. Esta é a primeira superfície tátil deformável e é constituída por um micro fluido (ver Figura 2.11b). O número de botões pode ser ajustado consoante o ecrã e a aplicação que se pretende [11].



a)



b)

Figura 2.11 Dispositivo da Tactus Technology, Inc. a) Teclado QWERTY tátil; b) Superfície tátil (botões).

Muitas das abordagens descritas acima tentam criar uma reacção tátil através de equipamentos mecânicos volumosos, como por exemplo, o FEELEX. Uma abordagem alternativa em interfaces tácteis de realidade aumentada é o utilizador usar luvas tácteis,

sapatos, coletes, etc. [12]. No entanto, nesta alternativa o corpo do utilizador tem de ser instrumentado com aparelhos de reacção táctil, limitando ou mesmo inibindo a interacção com objectos do quotidiano. Os utilizadores são capazes de perceber sensações tácteis geradas num ecrã de realidade aumentada (RA) táctil, no entanto não é possível perceberem toda a riqueza da textura dos objectos (físicos). Para monitores tácteis têm sido utilizados actuadores piezoeléctricos. No entanto, estes exigem uma tensão eléctrica de operação elevada. O investigador Ivan Poupyrev tem usado múltiplas camadas de piezoeléctricos que utilizam tensões de 5 a 10 V que se destinam a ser aplicadas em dispositivos móveis [9].

A Senseg é uma construtora de ecrãs sensíveis ao toque e desenvolveu um protótipo de um ecrã de toque com resposta táctil que consegue reproduzir texturas e sensações tácteis de superfícies.

A solução desenvolvida cria uma sofisticada sensação táctil que tem origem na força de Coulomb, isto é, na interacção entre cargas eléctricas do ecrã e do dedo (ver Figura 2.12). A passagem de uma corrente eléctrica muito baixa entre o dedo e o ecrã, uma vez modulada, cria uma força de atracção e repulsão que gera diversas sensações e mesmo vibração.

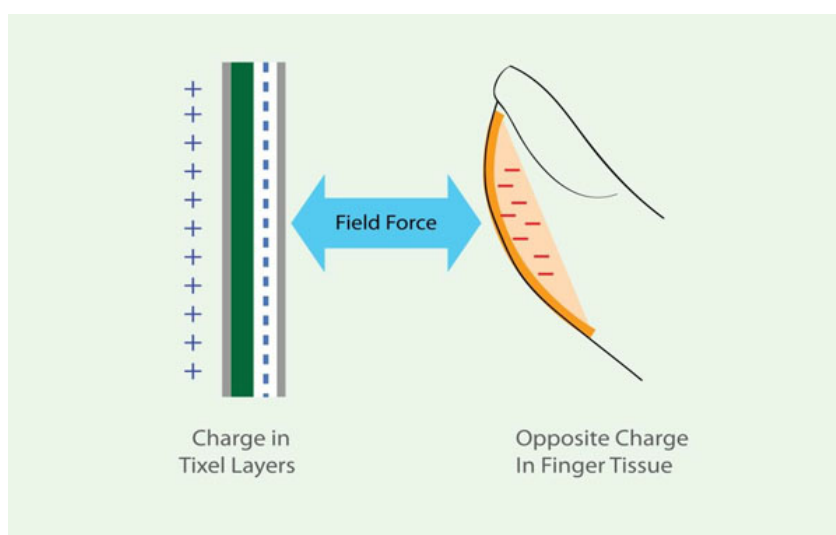


Figura 2.12 Força de Coulomb que se estabelece entre o dedo e uma superfície [13].

Ao contrário dos efeitos de vibração e dos piezoeléctricos, através deste protótipo é possível obter um controlo muito preciso na localização e no tipo de efeitos criados no utilizador. A tecnologia da Senseg é aplicada a várias escalas, desde *touchpads*, *smartphones*, *tablets* até ecrãs sensíveis ao toque de maiores dimensões. A este produto a Senseg está a chamar *Feel Screen* (ver Figura 2.13). Através do *Feel Screen* é possível adicionar uma outra dimensão à imagem dos objectos presentes no ecrã, e os “tradicionais” pixéis passam a ter a designação de tixéis, isto é, pixéis com informação de textura-toque.

O *Feel Screen*, como qualquer ecrã sensível ao toque, é constituído por camadas, sendo a mais interna a do LCD, que mostra a imagem, acima desta está uma camada sensível ao toque e, acima desta, uma camada de sensação de toque que gera campos electrostáticos suaves. As sensações de texturas são geradas através do controlo da força atractiva entre o



dedo e a camada superior. O ecrã consegue reproduzir texturas de superfície e criar sensações de vibração [13].

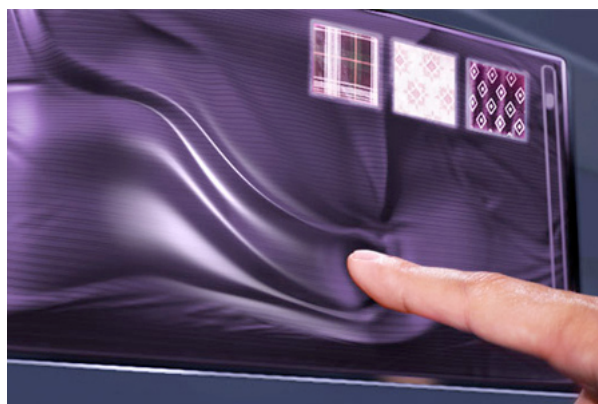


Figura 2.13 Dispositivo tátil *Feel Screen* da Senseg [13].

A par da Disney e da Senseg/Toshiba, a Nokia também tem mostrado grande interesse nesta área dos dispositivos de reacção tátil e desenvolveu um protótipo de um *smartphone*, o N900 (ver Figura 2.14), que permite aos utilizadores sentirem um padrão de texturas tácteis quando deslizam o dedo pelo seu ecrã (ver Figura 2.14). O objectivo da Nokia é desenvolver dispositivos que tenham vários níveis tácteis, dependendo de qual parte da superfície do ecrã está a ser tocada.

O protótipo tem duas camadas finas que se situam acima do visor LCD, em que a primeira é um condutor transparente, o óxido de índio e estanho, ITO, e a segunda é um isolador transparente, óxido de háfnio ( $\text{HfO}_2$ ). Quando o ITO é excitado com sinais com frequências entre 50 e 200 Hz e o utilizador desliza o dedo sobre o ecrã, as forças de atracção e repulsão proporcionam ao utilizador sensações semelhantes às provocadas por uma superfície texturada.

Esta tecnologia desenvolvida pela Nokia também tem algumas limitações uma vez que o utilizador tem de segurar no dispositivo com uma mão e manuseá-lo com a outra, para que o circuito eléctrico criado se feche [14].

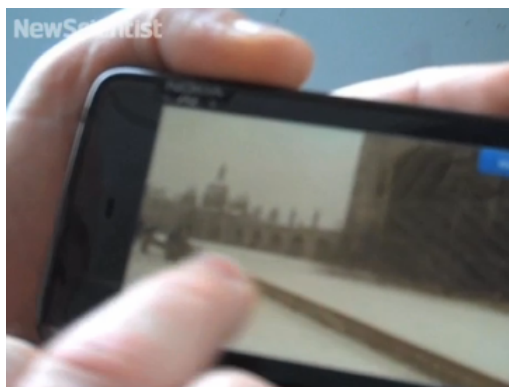


Figura 2.14 Protótipo de dispositivo de reacção tátil desenvolvido pela Nokia [14].

Ao contrário de algumas das abordagens anteriores para ambientes de realidade aumentada com a háptica, com o trabalho a desenvolver neste projecto o que se pretende é que os utilizadores não tenham que usar luvas ou outro dispositivo nas mãos.

## 2.3. Electrovibração directa e Inversa

O efeito de electrovibração (do inglês *electrovibration*) foi descoberto, acidentalmente, em 1954, por Mallinckrodt, que constatou que ao arrastar um dedo seco sobre uma superfície condutora coberta com uma fina camada isolante e excitado com um sinal de 110 V, sentia uma sensação de "borracha" [15]. A explicação sugerida sobre este efeito foi que a camada isolante de pele seca funcionava como se fosse uma camada dielétrica de um condensador, no qual as superfícies condutoras de tecido e fluidos do dedo são duas placas opostas. Quando é aplicada uma tensão alternada à superfície condutora, é criada uma força de atracção intermitente entre a superfície do dedo e a superfície condutora. No entanto, esta força de atracção é imperceptível quando o dedo está estático. Contudo, quando se move o dedo, esta força modula o atrito entre a superfície condutora e a pele do dedo, criando a sensação de que se está a tocar numa "borracha". Este efeito foi então designado de electrovibração [15].

A reacção tátil provocada pelas forças electroestáticas baseia-se na corrente eléctrica que flui da superfície e que estimula directamente as terminações nervosas do dedo do utilizador, enquanto que a reacção tátil provocada pela electrovibração é mecânica. Nesta última, as forças electrostáticas podem ser muito mais fracas e o seu efeito consiste em alterar as condições em que se fazem sentir as forças de atrito dinâmicas criadas pelo arrastamento do dedo na superfície.

O efeito de electrovibração, apesar de ter sido descoberto em 1954, até 1970 não foi utilizado para aplicações tácteis. Em 1970, Strong propôs um monitor tátil que era composto por uma matriz de pinos isolados com uma fina camada de dielétrico. Várias tensões eram aplicadas nos diferentes pinos e desse modo os utilizadores podiam sentir várias sensações tácteis.

Comparando com a vibração mecânica, a electrovibração não é uma tecnologia em si, mas sim uma categoria de sensação tátil que pode ser gerada de diversas maneiras. Num dispositivo desenvolvido pela Disney Research, o *Tesla-Touch*, através de electrovibração, é utilizado um eléctrodo transparente sobre um substrato transparente. Isto permite que a electrovibração seja utilizada para uma grande variedade de tecnologias e monitores [15].

Acrescentar uma reacção tátil ao toque em interfaces tem sido nestes últimos anos uma área bastante estudada. Uma das direcções de pesquisa e estudo tem sido a concepção de respostas tácteis para interfaces de toque através da vibração com actuadores piezoeléctricos, bobinas de voz e outros actuadores [16].

O dispositivo desenvolvido neste projecto é baseado na electrovibração, mais precisamente na electrovibração inversa.

Quando uma corrente alternada é injectada num objecto condutor é possível perceber uma sensação tátil deslizando o dedo na superfície do objecto. Isto porque a corrente alternada cria uma força electroestática intermitente que atrai o dedo para a superfície do

objecto. Esta sensação tátil não é resultante da corrente eléctrica que estimula os receptores do dedo, é puramente mecânica, como referido anteriormente.

O modelo matemático actualmente aceite para explicar a electrovibração equipara-a a um componente capacitivo, onde os objectos condutores e os líquidos iónicos do dedo funcionam como duas placas de um condensador [1]. Esta força electrostática  $F_e$  é dada por:

$$F_e(t) = \frac{\epsilon_0 A V^2(t)}{2 \left( \frac{T_s}{\epsilon_s} + \frac{T_p}{\epsilon_p} \right) (T_s + T_p)} \quad (1)$$

onde  $V$  é a tensão entre o dedo e o eléctrodo;  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_s$  e  $\epsilon_p$  são constantes de permitividade do vácuo, da pele e do isolador, respectivamente;  $T_s$  é a espessura da pele;  $T_p$  é a espessura do isolador e  $A$  é a área de contacto [1].

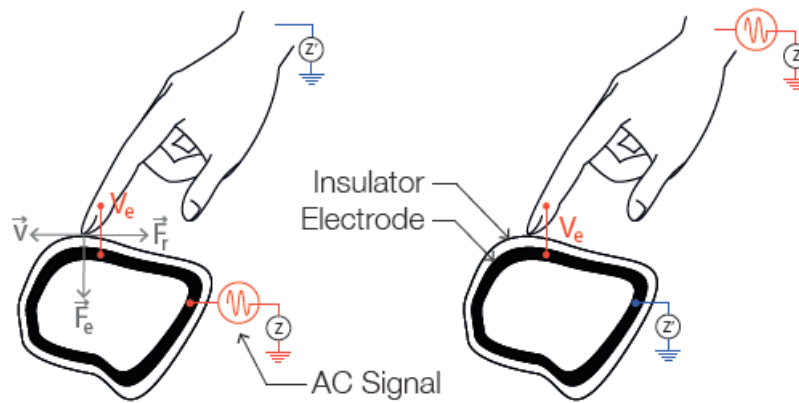


Figura 2.15 Electrovisbrção directa (à esquerda) e Electrovisbrção Inversa (à direita) [1].

Quando o sinal é injectado no utilizador, em vez de ser no objecto, o método deixa então de ser designado de electrovibração directa passando a designar-se de electrovibração inversa (ver Figura 2.15). O sinal é injectado no utilizador e o objecto apenas está ligado à mesma terra, ou seja, partilham a mesma referência eléctrica. Este processo inverso pode ser utilizado uma vez que a polaridade da tensão não é importante e os efeitos são os mesmos, conseguindo criar as mesmas sensações tácteis e apresentando mais funcionalidade, sendo também muito mais prático.

Para comparar as diferenças sentidas entre a electrovibração directa e a electrovibração inversa *Bau et al* realizaram testes em 10 indivíduos [1]. Primeiro, o sinal era injectado numa placa condutora onde o utilizador colocava posteriormente uma mão, enquanto que a outra mão estava na placa ligada à referência eléctrica, terra. De seguida, em vez de injectar o sinal na placa condutora fez-se esta injeccção directamente no utilizador e nenhum dos utilizadores conseguiu perceber qualquer tipo de diferenças entre as sensações verificadas nos dois métodos.

Usando o efeito da electrovibração inversa é possível construir um dispositivo em que apenas é necessário dispor de um gerador de sinal ligado a qualquer parte do corpo do

utilizador e em que qualquer objecto ou ecrã pode facilmente ser adaptado para ser ligado a uma referência eléctrica comum.

## 2.4. Impedância do corpo humano

Ao planear conceber um dispositivo para fornecer uma corrente eléctrica ao corpo humano é preciso ter em conta que, do ponto de vista eléctrico, o corpo humano pode ser representado por um conjunto de resistências e condensadores, no entanto, nem os valores nem a resposta dos mesmos é linear. Estes valores variam de pessoa para pessoa e, para um mesmo indivíduo, as variações dependem das condições psicofisiológicas e ambientais.

Os principais factores que contribuem para as variações de impedância do corpo humano são [18] [19]:

- **Estado da pele.** A maior parte da resistência do corpo está localizada na pele e existem alguns factores que a aumentam ou diminuem. O suor diminui consideravelmente os valores da resistência da pele.
- **Tipo de contacto.** A resistência do corpo humano depende também do trajecto da corrente, como representado na Figura 2.16.
- **Superfície de contacto.** Quanto maior a área de contacto menor será a resistência.
- **Pressão de contacto.** A resistência diminui com o aumento da pressão sobre a área sob tensão.

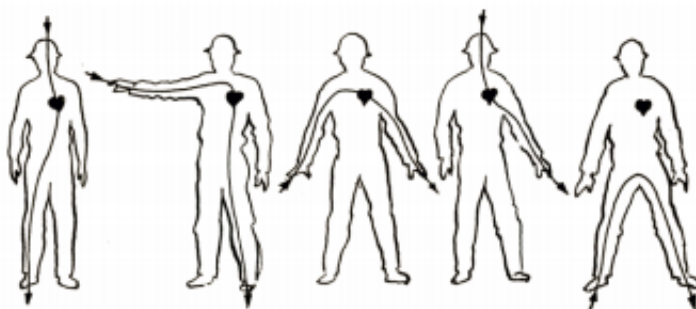


Figura 2.16 Trajectos da corrente eléctrica no corpo humano [17].

- **Duração do contacto.** Quanto maior for o tempo que a corrente circula pelo corpo humano maior será o aumento da temperatura dos fluidos internos consequentemente menor a resistência. No entanto, o excesso de calor pode levar à carbonização dos tecidos, com o consequente aumento da resistência.
- **Natureza da corrente.** Para corrente contínua e alternada a 50 Hz, os valores da resistência do corpo humano apresentados são praticamente os mesmos. No entanto, com o aumento da frequência a resistência diminui sensivelmente.
- **Taxa de álcool no sangue.** O álcool diminui a resistência do corpo.

Dada a impossibilidade de controlar todas as variáveis de que depende a impedância do corpo humano é então necessário conceber uma forma de controlo da corrente, ou tensão, manual ou automaticamente, que permita adequar o sinal a injectar a cada utilizador.

## 2.5. Efeitos da corrente eléctrica no corpo humano

Muitos se questionarão se a injeção de uma corrente eléctrica no corpo humano não provocará danos imediatos ou até danos futuros no corpo do utilizador. Ao desenvolver um dispositivo baseado no efeito da electrovibração é necessário conhecer os riscos e a forma como o corpo humano reage à passagem da corrente eléctrica.

O corpo humano apresenta uma grande resistência ao choque eléctrico nos primeiros instantes. No entanto, se a passagem da corrente eléctrica se der de forma continuada, dependendo das características da mesma pode provocar danos em tecidos musculares, nervosos e cerebrais. A corrente eléctrica pode também levar à formação de coágulos sanguíneos e até à paralisação respiratória e cardíaca. Estes efeitos da passagem de corrente dependem das características da própria corrente e das características do corpo do indivíduo. As características associadas à corrente são a intensidade e a frequência, o tempo que esta permanece no corpo e a área de contacto. Das características do indivíduo os factores que mais interferem são a pele, a constituição física e o estado de saúde.

Existe um ponto, conhecido como o Limiar de Sensação, a partir do qual se começa a sentir a corrente a passar no corpo. Este limiar é de 1 mA para correntes alternadas e de 5 mA para correntes contínuas [18].

Dos efeitos que a corrente eléctrica tem no organismo destacam-se quatro, nomeadamente a tetanização, a queimadura, a paragem respiratória e a fibrilhação ventricular.

### **Tetanização**

A tetanização é um fenómeno de contracção muscular em consequência de um impulso eléctrico. Quando se verifica uma diferença de potencial numa fibra nervosa, o músculo contrai. Se os estímulos eléctricos forem de tal modo rápidos que impeçam o músculo de voltar ao estado de repouso, as contracções somam-se, dando origem ao fenómeno de contracção tetânica. Se essa frequência for de tal modo elevada a contracção muscular dá-se de forma completa e só se verifica a relaxação quando os estímulos acabam.

A tetanização é mais fácil de ser verificada para correntes alternadas, no entanto, para correntes contínuas, se a sua duração e intensidade forem suficientes, também se pode verificar este efeito [18][19].

### **Queimaduras**

A passagem de corrente eléctrica pelo organismo pode produzir queimaduras no corpo humano por efeito de Joule. O grau da queimadura é sempre mais crítico nos pontos de entrada e saída de corrente, uma vez que a pele tem uma resistência elevada, contrariamente aos tecidos internos que são bons condutores eléctricos. A área de contacto também influencia os danos causados por queimaduras. Para um mesmo valor de corrente, quanto menor for a área

de contacto maior será a densidade de corrente e maiores serão os danos causados nos tecidos.

Para acidentes que envolvam alta tensão predominam os efeitos térmicos da corrente e o calor produzido leva à destruição dos tecidos superficiais e profundos, provocando o rompimento de artérias. As queimaduras mais profundas podem levar à morte por insuficiência renal. Nos acidentes com tensões baixas os efeitos térmicos são pouco significativos. Os efeitos mais preocupantes são devidos à duração e intensidade da corrente, que podem levar à morte por paragem respiratória e fibrilhação ventricular [18][19].

### Paragem Respiratória

A paragem respiratória também pode ser um dos efeitos da passagem da corrente eléctrica pelo organismo e verifica-se devido à contracção do diafragma. Quando o diafragma se contrai de forma contínua pode provocar asfixia [18][19].

### Fibrilhação Ventricular

Um dos possíveis efeitos da passagem de corrente eléctrica pelo corpo humano é a fibrilhação ventricular. O coração é formado por fibras que se contraem a uma velocidade entre 60 a 100 impulsos por minuto, e é extremamente sensível a correntes eléctricas com origem externa. A corrente eléctrica pode alterar a sincronização e coordenação do movimento do coração, paralisando o efeito de bombeamento do sangue. A esta anomalia dá-se o nome de fibrilhação e é especialmente mais perigosa quando ocorre na zona ventricular, pois nesta zona o efeito é irreversível, tornando o funcionamento irregular e desordenado das fibras do músculo cardíaco mesmo depois da corrente eléctrica deixar de actuar no corpo do indivíduo [18][19].

Na Figura 2.17 é possível verificar através de um electrocardiograma as alterações no batimento cardíaco provocadas pela passagem da corrente eléctrica.

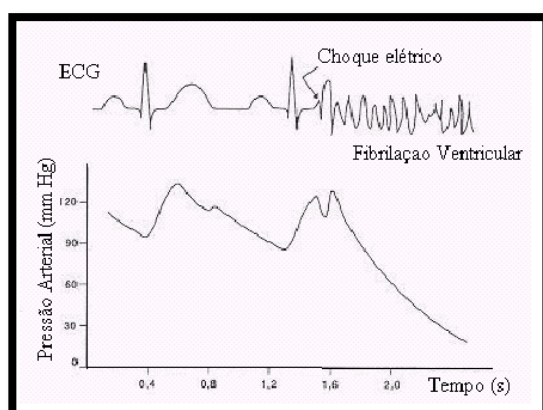


Figura 2.17 Efeitos da corrente eléctrica no batimento cardíaco (ECG) e na Pressão Arterial [18].

Os valores de intensidade de corrente para que ocorra a fibrilhação do coração encontram-se entre os 30 mA e os 500 mA para durações superiores a 0,25 s. Estes valores de corrente são apenas o resultado de alguns estudos, no entanto, tem-se tentado encontrar um valor mínimo para que ocorra fibrilhação em relação ao tempo de circulação da corrente no

corpo humano, mas não se conseguiu ainda obter valores conclusivos devido a alguns factores, como por exemplo, a impossibilidade de realizar este tipo de testes em humanos e a dificuldade em extrapolar os dados obtidos em animais [18]. Na Tabela 2.1 encontram-se resumidos alguns dos efeitos da passagem de corrente eléctrica pelo corpo humano.

A passagem de corrente eléctrica no corpo humano pode ainda originar outros efeitos como a electrólise do sangue, com alteração do pH, problemas renais, deslocamento de órgãos e músculos, e ainda danos na visão e no cérebro. Alguns problemas poderão surgir apenas muito tempo depois do choque como, por exemplo, os danos em órgãos internos, incluindo danos cerebrais, problemas de ordem neurológica na área de controlo motor e, principalmente, na dificuldade de memorização de factos e eventos no curto prazo [18] [19].

Tabela 2.1 Efeitos da corrente eléctrica no corpo humano [18].

<b>CORRENTE (mA)</b>	<b>PERTURBAÇÕES PROVÁVEIS DO CHOQUE</b>	<b>ESTADO APÓS CHOQUE</b>	<b>SALVAMENTO</b>	<b>ESTADO APÓS SALVAMENTO</b>
<b>&lt; 1</b>	Nenhuma	Normal	Desnecessário	Normal
<b>1 a 9</b>	Sensação de mau estar, contrações musculares	Normal	Desnecessário	Normal
<b>9 a 20</b>	Sensação dolorosa, contrações violentas, perturbações circulatorias	Morte Aparente	Respiração Artificial	Reabilitação
<b>20 a 100</b>	Sensação insuportável, contrações violentas, graves perturbações circulatorias, fibrilhação ventricular	Morte Aparente	Respiração Artificial	Reabilitação ou morte
<b>&gt;&gt; 100</b>	Asfixia imediata, fibrilhação ventricular, queimaduras graves	Morte Aparente ou imediata	Praticamente impossível	Morte

No desenvolvimento do dispositivo de reacção tátil será importante garantir que, por razões de segurança, em nenhuma circunstância o utilizador possa ficar sujeito a uma corrente eléctrica superior a 9 mA.

### 3. O dispositivo de reacção táctil

O dispositivo de reacção táctil é constituído por blocos de circuitos electrónicos, cada um com a sua função própria, interligados por forma a gerar um sinal periódico, de características ajustáveis, que se destina a ser injectado no utilizador. Na Figura 3.1 encontram-se representados simbolicamente os diferentes blocos dos circuitos electrónicos que compõem o dispositivo táctil.

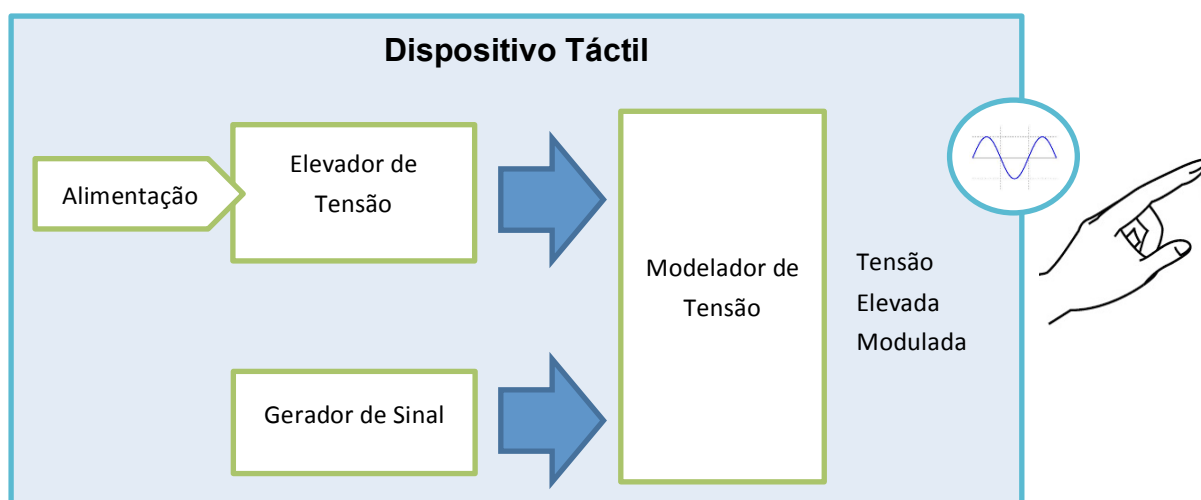


Figura 3.1 Diagrama de blocos do dispositivo táctil.

O bloco do Elevador de Tensão será responsável por fornecer uma tensão tipicamente de 200V a partir de duas pilhas convencionais de 9V. O bloco do Gerador de Sinal permitirá ao operador definir as características do sinal gerado, nomeadamente quanto à forma, amplitude e frequência. Finalmente o sinal gerado é utilizado para modular a tensão elevada, produzindo assim um sinal para injectar no utilizador, com intensidade de corrente eléctrica suficientemente elevada para provocar sensações tácteis.



### 3.1. Circuito gerador de sinal

Um dos constituintes do gerador de sinal é um microcontrolador Arduino Atmega328, programado para gerar um sinal digital. Através de um conversor digital-analógico (DAC) de 8 *bits*, feito com resistências em rede R-2R, o sinal é convertido para analógico com níveis de tensão de 0 V a 5 V.

Através do código implementado, o microcontrolador gera sinais com formas de onda quadrada, triangular, dente de serra e sinusoidal que são guardados em memória. As formas do sinal são seleccionadas manualmente pelo utilizador através de interruptores. A frequência e a amplitude destes sinais são controladas de forma independente através de potenciómetros. Na Figura 3.2 encontram-se representados simbolicamente os diferentes blocos que compõem o circuito do gerador de sinal.

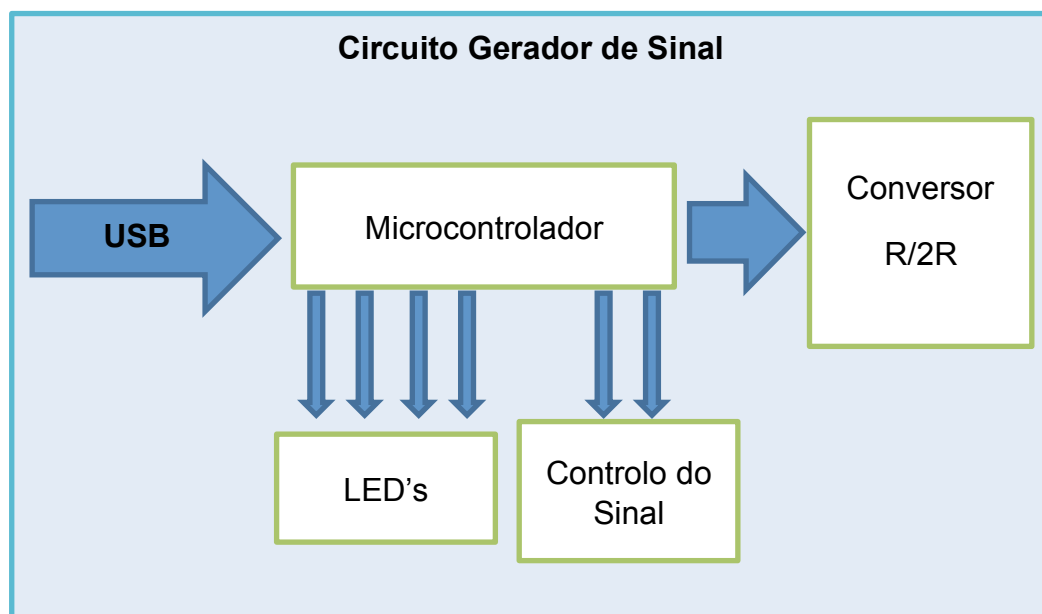


Figura 3.2 Diagrama de blocos do Gerador de Sinal.

#### 3.1.1. Microcontrolador

O microcontrolador é o componente principal do gerador de sinais e a sua principal função é gerar um sinal com a forma desejada e com a amplitude e frequência ajustável pelo utilizador.

A escolha do microcontrolador recaiu sobre o Atmega328 (ver Figura 3.3), do fabricante Arduino™, com base na facilidade com que é programado, associada à disponibilização de um ambiente de programação com bibliotecas de funções de muito alto nível. Outros factores decisivos na escolha foram as vantagens de ter um baixo custo, ser compatível com vários sistemas operativos e de dispor de muitos recursos de acesso livre (*open-source*) [22].

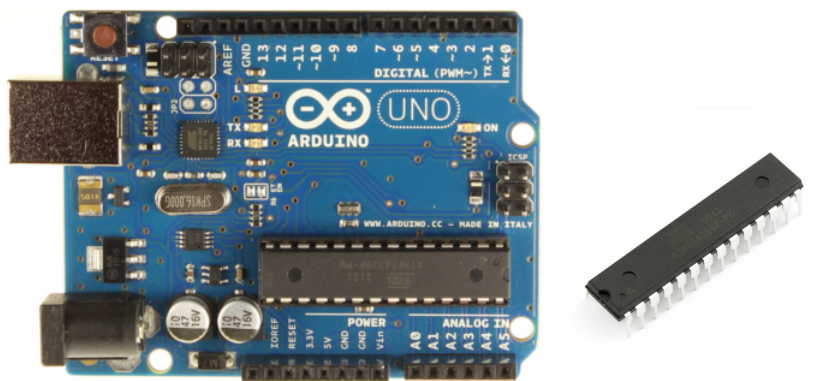


Figura 3.3 Placa de desenvolvimento Arduino Uno com microcontrolador Atmega328 [20].

Na Tabela 3.1 encontram-se resumidas algumas das características do microcontrolador.

Tabela 3.1 Características do microcontrolador [21].

CARACTERÍSTICAS	DESCRIÇÃO
<b>Tipo de memória</b>	<i>Flash</i>
<b>Memória de Programação</b>	32 KB
<b>Memória RAM</b>	2 KB
<b>Memória EEPROM</b>	1 KB
<b>Clock Máximo</b>	20 MHz
<b>ADC</b>	10 Bits
<b>Consumo a 25 ° (Modo activo)</b>	0.2 mA 1 MHz (1.8 V)
<b>PWM</b>	Sim
<b>I2C</b>	Sim
<b>SPI</b>	Sim
<b>RS232</b>	Sim
<b>Pinos de I/O digital</b>	14
<b>Pinos Analógicos</b>	6
<b>Pinos PWM</b>	6
<b>Tensão de Operação</b>	5 V

Na Figura 3.4 encontra-se representado o diagrama com as saídas/entradas do microcontrolador Atmega328. As 8 portas digitais (2, 3, 4, 5, 6, 11, 12 e 13) são utilizadas como saídas do sinal. É através destas saídas que obtemos o sinal digital. As saídas numeradas de 14 a 17 são utilizadas como saídas de indicação, ligadas aos LED's de informação, permitindo ao utilizador identificar visualmente que tipo de forma de sinal é que está o microcontrolador a gerar. As entradas analógicas numeradas de 23 a 26 são entradas de controlo e através delas é possível mudar a forma de sinal que o microcontrolador gera. Por fim, as entradas analógicas 27 e 28 são também entradas de controlo que permitem ajustar a frequência do sinal gerado

pelo microcontrolador e ajustar também a largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) do sinal quadrado.

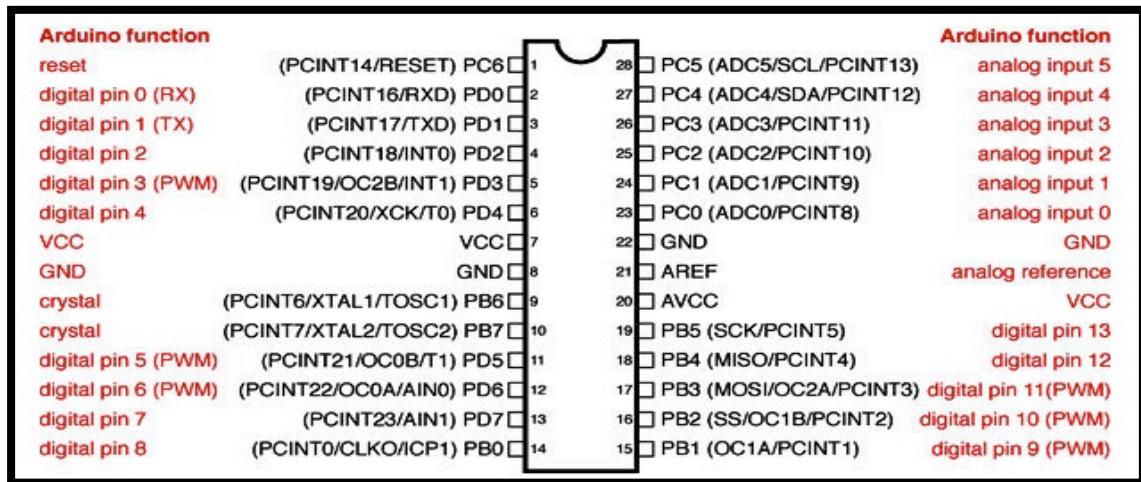


Figura 3.4 Diagrama dos terminais de saída e entrada do microcontrolador Atmega328 [22].

### 3.1.2. Programação do microcontrolador

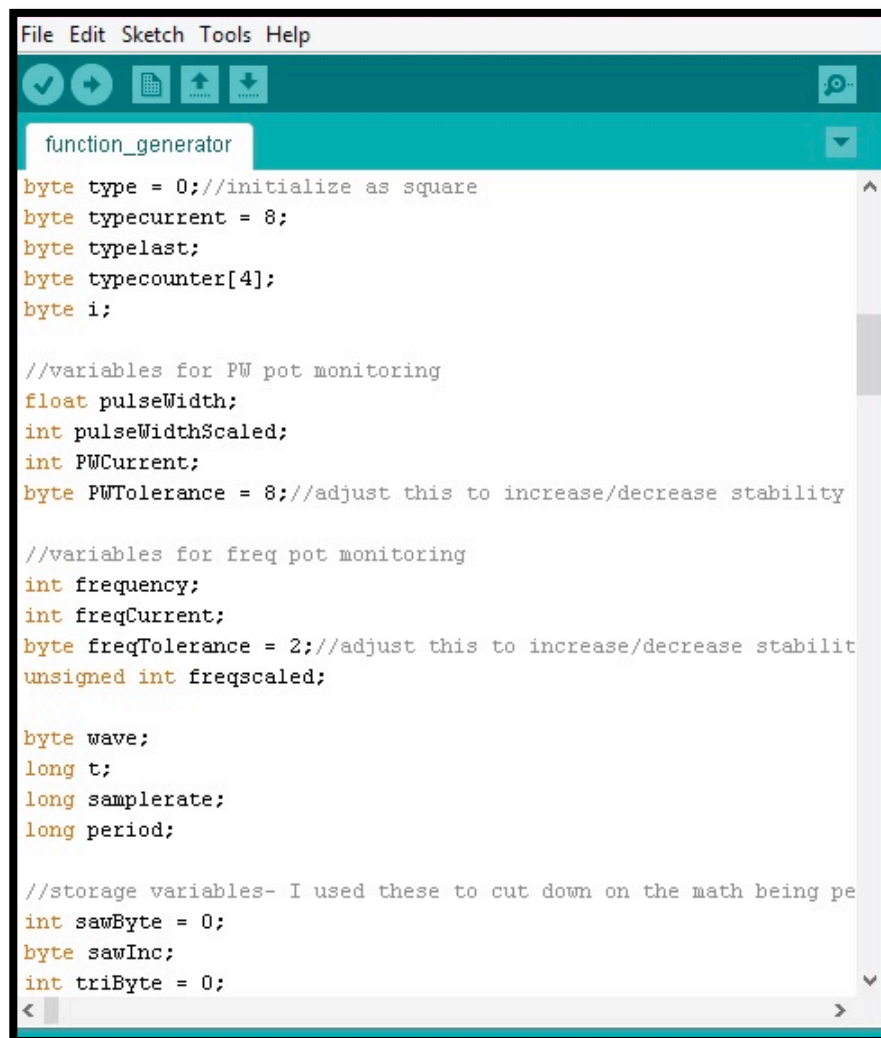
A Arduino disponibiliza um ambiente de desenvolvimento integrado com o *hardware* (IDE – *Integrated Development Environment*) para a geração dos programas (*sketches*) que são enviados para o microcontrolador (ver Figura 3.5) através de ligação USB. O IDE do Arduino foi desenvolvido em linguagem JAVA baseado no projecto *Processing*, na biblioteca AVR-gcc (para microcontroladores da família AVR). A linguagem de programação do Arduino é baseada no projecto *Wiring* e pode ser executada nas plataformas Windows, OSX e Linux [20].

É através do gerador de sinais que é possível obter as diferentes sensações tácteis que o utilizador consegue perceber através da injeção de uma corrente AC no seu corpo. Para que seja possível a obtenção destas variadas sensações tácteis é necessária a combinação dos diferentes parâmetros do sinal, a amplitude, a forma e a frequência, daí que é possível obter uma vasta gama de sensações. Por exemplo, com a combinação de um sinal com a forma sinusoidal e com determinada amplitude, é possível criarem-se muitas sensações tácteis com a simples variação da frequência.

Como base de trabalho para a programação do microcontrolador foi utilizado o projecto de acesso livre *Arduino Waveform Generator*, disponibilizado pela Instructables [24]. Depois da análise do código foram realizadas algumas alterações de forma a satisfazer as necessidades.

As alterações efectuadas ao código de implementação do gerador de sinal foram realizadas no sentido de obter sinais com uma gama de frequências mais baixa. O código original gera sinais digitais com níveis que variam entre 0 e 255 (8 *bits* de resolução), com uma gama de frequências a partir de 50 Hz até aproximadamente 20 MHz. Depois de realizadas algumas experimentações concluiu-se que seria desnecessária uma gama de frequências tão elevada uma vez que as sensações tácteis sentidas pelo utilizador encontravam-se num intervalo de 50 a 700 Hz. Posteriormente surgiu a curiosidade sobre quais as sensações tácteis

que eram criadas com sinais de frequências baixa, menores que 50 Hz. Os resultados foram favoráveis, e, nesse sentido, foram efectuadas alterações no código para que o microcontrolador gerasse sinais com frequências desde, aproximadamente, 5 Hz até 1000 Hz. Estes resultados serão explicados mais à frente no capítulo dos Resultados.



```
function_generator

byte type = 0; //initialize as square
byte typecurrent = 8;
byte typelast;
byte typecounter[4];
byte i;

//variables for PW pot monitoring
float pulseWidth;
int pulseWidthScaled;
int PWCurrent;
byte PWTolerance = 8; //adjust this to increase/decrease stability

//variables for freq pot monitoring
int frequency;
int freqCurrent;
byte freqTolerance = 2; //adjust this to increase/decrease stability
unsigned int freqscaled;

byte wave;
long t;
long samplerate;
long period;

//storage variables- I used these to cut down on the math being pe
int sawByte = 0;
byte sawInc;
int triByte = 0;
```

Figura 3.5 Ambiente de desenvolvimento IDE da Arduino.

### 3.1.3. Conversor digital-analógico

O sinal gerado pelo microcontrolador é digital e, portanto, é necessário convertê-lo para analógico. Para isso foi utilizado um conversor digital-analógico através de resistências, designado por rede R-2R. Este circuito de conversão foi utilizado devido à sua simplicidade, eficácia, custo e, contrariamente a circuitos integrados (DAC), este não necessita de alimentação. Neste método a rede resistiva é composta por apenas dois valores de resistências, R e 2R (duas vezes o valor de R). Neste caso foram utilizadas resistências de 10 kΩ e 20 kΩ. Na Figura 3.6 está representado o esquema simbólico do conversor e uma fotografia do circuito já montado em placa de prototipagem rápida.

Dadas as características do microcontrolador e da programação efectuada o sinal analógico de saída do conversor varia entre os 0 V e os 5 V. Com a utilização da rede R-2R a corrente máxima que o circuito pode fornecer depende do valor digital gerado, pelo que há conveniência em usar, posteriormente, um circuito seguidor de tensão para garantir níveis de corrente eléctrica suficientes para o correcto funcionamento dos circuitos a jusante.

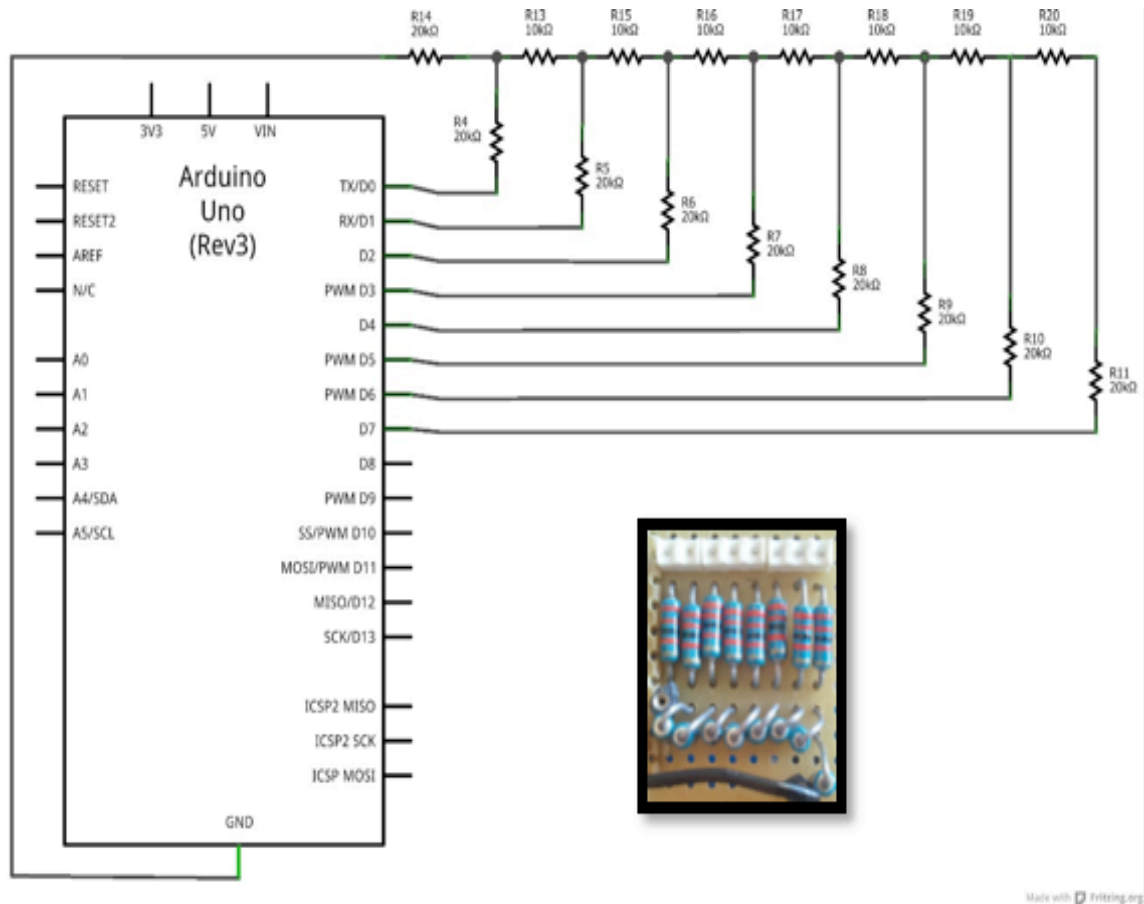


Figura 3.6 Circuito de conversão digital-analógico R-2R desenhado no programa Fritzing V 0.8.0 e fotografia das resistências R-2R montadas numa placa de prototipagem rápida.

### 3.2. Elevador de tensão

Para obter uma tensão elevada com níveis que permitissem a ocorrência do fenómeno da electrovibração foi decidido recorrer a um controlador DC-DC elevador de tensão. A escolha recaiu sobre o circuito integrado MAX773 e o dimensionamento foi feito para que se obtivesse uma tensão à saída de 200 V gerada a partir de duas pilhas de 9 V ligadas em série.

O MAX773 aceita tensões de alimentação de 3 V até 16,5 V, no entanto, devido à presença de um regulador interno (*internal shunt regulator*) suporta tensões de alimentação superiores muito acima destes valores. O nível da tensão de saída do MAX773 pode ser ajustado através de duas resistências. Na implementação de um circuito capaz de gerar tensões na ordem dos 200 V é necessário escolher adequadamente os componentes para que suportem estes níveis de tensão.

O esquema simbólico do circuito da Figura 3.7 é retirado da folha de especificações do MAX773 e corresponde ao circuito utilizado, e posteriormente adaptado, para implementar o elevador de tensão do dispositivo tátil.

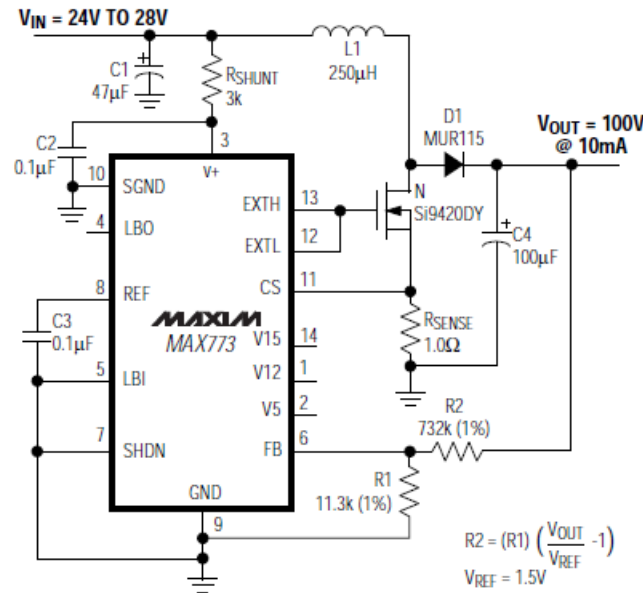


Figura 3.7 Desenho simbólico do circuito de elevação de tensão baseado no circuito integrado MAX773 [25].

As duas resistências que permitem o ajuste da tensão de saída são R1 e R2 (ver Figura 3.7) e estão relacionadas pela expressão [25]:

$$R2 = R1 \left( \frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (2)$$

em que  $V_{ref} = 1,5$  V. Tendo em conta que o  $V_{out} = 200$  V, e escolhendo  $R1 = 10$  kΩ, é possível calcular R2 da seguinte forma:

$$R2 = 10000 \left( \frac{200}{1,5} - 1 \right) = 1323,3k\Omega \quad (3)$$

Ao circuito representado na Figura 3.7 foram feitas algumas alterações, como a substituição do transístor MOSFET, o SI9420DY, por outro transístor, um BUK 444/800B (MOSFET), que suporta um limite máximo de tensão de 800 V, garantindo desta forma o bom funcionamento sem que este opere próximo dos valores limite. O díodo, MUR115, foi também substituído por um outro díodo, o MUR160, que tem um limite de tensão máximo de 600 V, e assim como o MOSFET opera neste circuito longe do seu limite máximo. Todos os outros componentes foram devidamente escolhidos de forma a suportarem a tensão necessária para que o circuito funcione sem sobrecarregar nenhum componente com tensão/corrente a mais.

Depois de realizadas as alterações o resultado final deste circuito elevador de tensão é o que está representado da Figura 3.8.

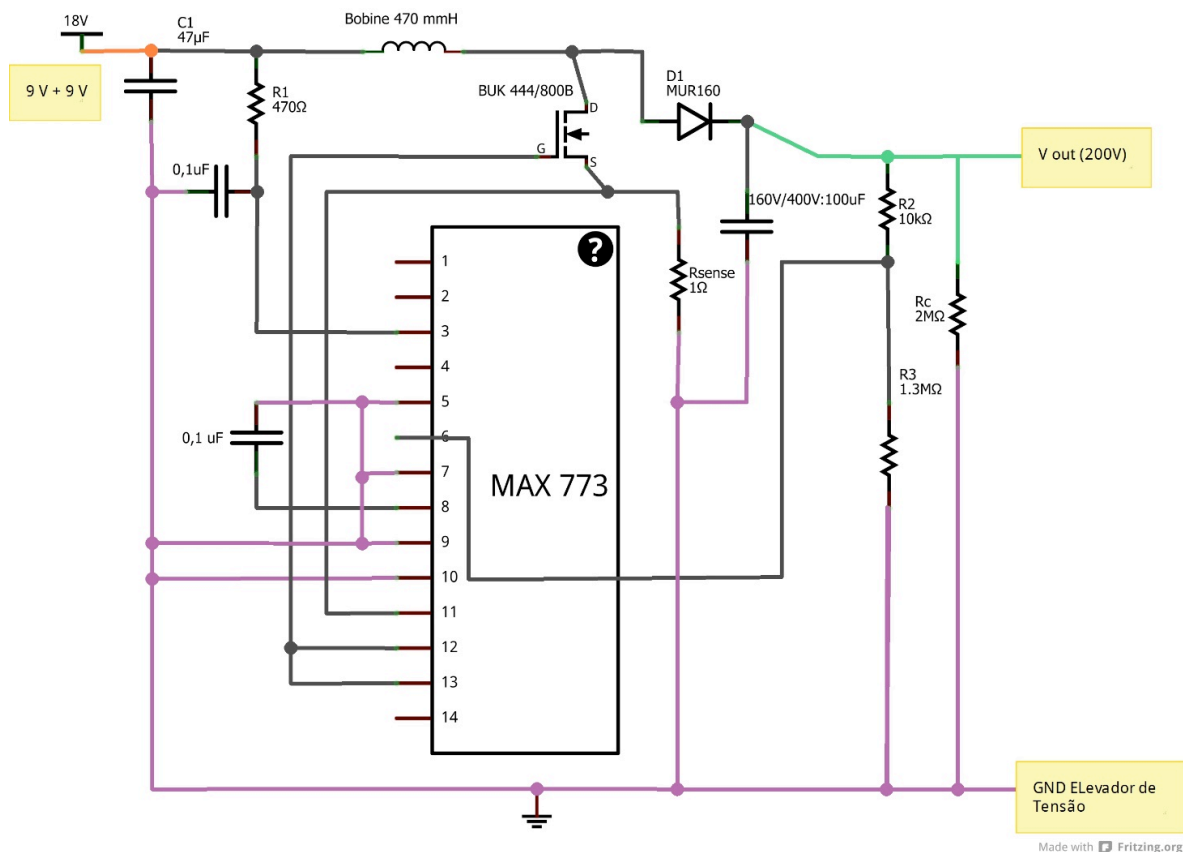


Figura 3.8 Elevador de tensão desenhado no programa *Fritzing* V 0.8.0.

Por questões de segurança optou-se por alimentar o circuito elevador a partir de duas pilhas de 9 V capazes de fornecer uma corrente máxima de 200 mA. Desta forma a energia disponível é insuficiente para causar danos graves ao utilizador em caso de ocorrência de alguma falha ou avaria. Admitindo que o circuito teria uma eficiência de 100% na elevação de tensão, a corrente máxima que poderá disponibilizar será de cerca de 18 mA.

### 3.3. Modelador de Tensão

O modelador de tensão é constituído por um amplificador seguidor de tensão e por um amplificador operacional que controla a amplificação de tensão feita por uma cascata de transístores em que o andar final é constituído por um transístor em montagem de emissor comum (ver Figura 3.9).

O amplificador seguidor de tensão, de ganho unitário, é utilizado apenas para isolar a impedância de saída do conversor digital-analógico do resto do circuito. Este amplificador coloca à saída uma tensão igual à de entrada (daí o seu nome). A montagem utilizada para este caso é uma montagem de um amplificador não-inversor em que  $R2 = 0$  e  $R1 = \infty$ . Desta forma, sabendo que a fórmula do ganho para a configuração não-inversora é dada por [26]:

$$G = 1 + \frac{R2}{R1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1 \quad (4)$$



The diagram shows a differential amplifier circuit. The LM741 op-amp is configured with an offset nulling circuit using a 10kΩ resistor and a -9V supply. The OP07 op-amp is configured with a gain of 470k using a 470kΩ resistor. The circuit includes a 5V supply, a 9V battery, and various resistors (R26, R27, R29, R33). The output is labeled 'Vout Tátil'.

A necessidade de usar uma resistência, capaz de dissipar uma potência elevada, ligada ao colector do transístor de saída (BF442) faz com que, devido à queda de potencial aos seus terminais, a tensão de saída seja inferior à que é disponibilizada pelo circuito de elevação de tensão.

### 3.4. Circuito do dispositivo táctil

Na Figura 3.10 pode observar-se o esquema simbólico da forma como foram integrados o circuito elevador de tensão, o circuito de geração de sinal e o circuito de modelação da tensão. É de notar a inclusão dos circuitos de ajuste dos parâmetros do sinal a gerar e dos LED's de informação.



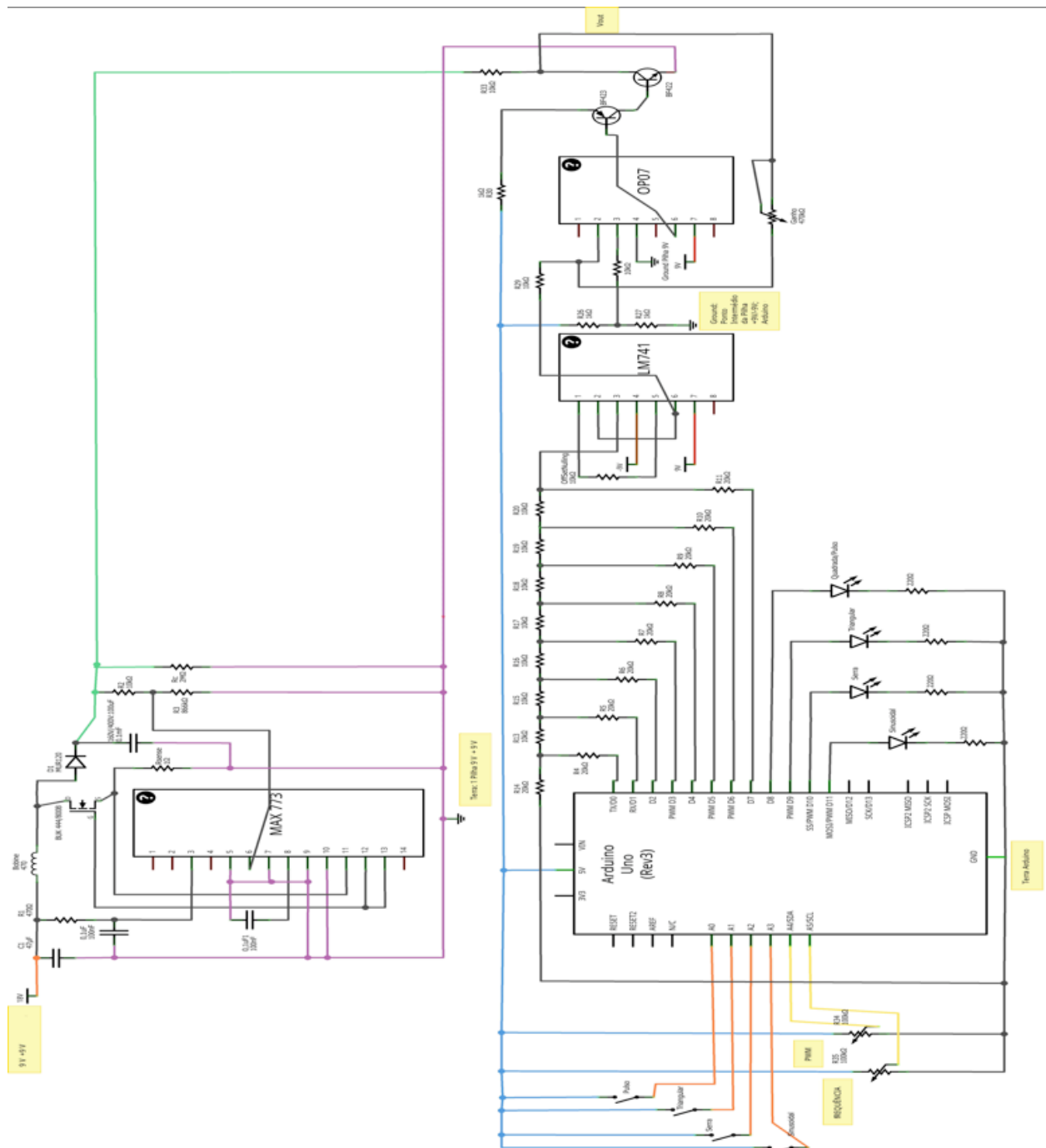


Figura 3.10 Esquema electrónico do dispositivo desenhado no programa *Fritzing V 0.8.0*.

O circuito foi montado em placas de prototipagem rápida, podendo ser observado na fotografia da Figura 3.11.

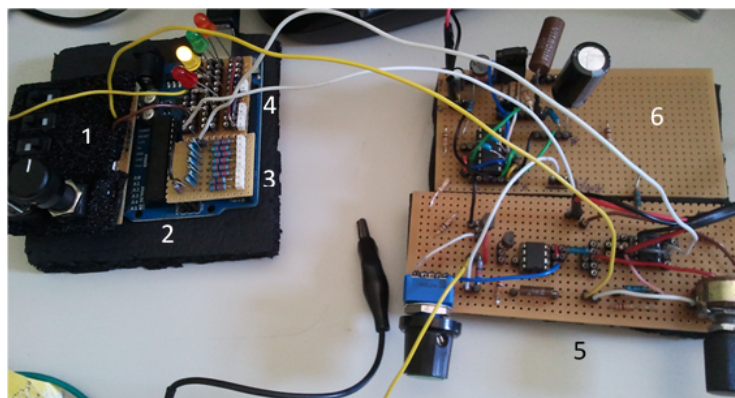


Figura 3.11 Montagem do dispositivo tátil. (1) Electrónica de controlo. (2) Microcontrolador (Arduino Uno). (3) Conversor digital-analógico. (4) LED's de informação. (5) Amplificação. (6) Elevador de Tensão.

### 3.5. Operação do dispositivo tátil

A electrónica de controlo do dispositivo tátil desenvolvido é constituída por potenciómetros e interruptores.

Através dos potenciómetros (ver Figura 3.12) é possível ajustar a frequência dos sinais gerados pelo microcontrolador bem como a largura de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) do sinal quadrado. O potenciómetro representado na Figura 3.12 à esquerda é o que permite o ajuste da frequência. Este potenciómetro é ligado à entrada analógica do Arduino Uno A5 (*Analogue Input*).

O potenciómetro representado na Figura 3.12 à direita é o que permite o ajuste da largura de pulso (PWM). Este é ligado à entrada analógica do Arduino Uno designada por A4.



Figura 3.12 Potenciómetros de controlo da frequência do sinal e da largura de pulso.

Para seleccionar a forma do sinal gerado são utilizados quatro interruptores que são ligados às restantes quatro entradas analógicas do microcontrolador, designadas por A0, A1, A2 e A3. Na Figura 3.13 podem ser observados estes interruptores.



Figura 3.13 Interruptores de controlo.

Da esquerda para a direita, a actuação dos interruptores permite escolher a geração de um sinal, respectivamente, quadrado, triangular, dente de serra e sinusoidal.

Através do potenciómetro designado *intensity* (ver Figura 3.14) é possível ajustar o ganho de tensão do sinal à saída do Modelador de Tensão. Ao variar o potenciómetro no sentido horário, o ganho aumenta, logo, e em consequência disso, o valor de tensão pico-a-pico do sinal que é injectado no utilizador aumenta. Ao variar o potenciómetro no sentido anti-horário o ganho é diminuído, assim como o valor de tensão pico-a-pico do sinal.



Figura 3.14 Ajuste do ganho do sinal.

### 3.6. LED's de informação

Os LED's constituem uma importante fonte de informação visual sobre o comportamento do sistema. Através deles é possível saber que forma de sinal é que está a ser gerada pelo microcontrolador.

O dispositivo dispõe de um total de 4 LED's com funções diferentes, representados na Figura 3.15. A informação representada por cada LED encontra-se descrita na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Descrição da informação representada pelos LED's.

Cor	Descrição
<b>Vermelho</b>	Indica que o microcontrolador está a gerar um sinal quadrado
<b>Cor de laranja</b>	Indica que o microcontrolador está a gerar um sinal triangular triangular
<b>Amarelo</b>	Indica que o microcontrolador está a gerar um sinal dente de serra
<b>Verde</b>	Indica que o microcontrolador está a gerar um sinal sinusoidal

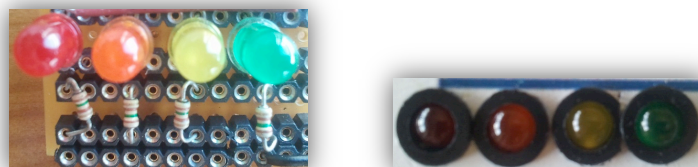


Figura 3.15 LED's de informação.

### 3.7. Design e montagem do dispositivo tátil

A montagem do circuito requereu uma atenção especial à organização e à concentração dos componentes, sem que fosse posta em causa a funcionalidade, tendo como objectivo uma minimização do espaço utilizado, sempre com o objectivo de atingir uma boa estética final. Para isso seria necessário colocar os circuitos, isto é, o microcontrolador, o elevador de tensão, o circuito de amplificação e o conversor DAC dentro de numa caixa, sem que isso interferisse com o controlo, comodidade e acessibilidade da sensação tátil.

Depois da colocação dos circuitos dentro da caixa, e depois de registadas as medidas necessárias, procedeu-se ao corte da superfície superior da caixa para que fosse possível fazer o controlo do dispositivo com os componentes anteriormente referidos: interruptores, potenciómetros e os LED's de informação.

A apresentação final da caixa foi também tida em conta e por isso foi criado um logótipo para este dispositivo tátil, **6º Sentido** (ver Figura 3.16).



Figura 3.16 Logótipo do dispositivo tátil.

Após os circuitos estarem inseridos na caixa, bem como os autocolantes com o devido *design* na superfície desta, a apresentação final do dispositivo é a que se encontra na Figura 3.17. Para poder ligar e desligar a alimentação eléctrica do dispositivo foram inseridos dois interruptores na parte de trás do dispositivo. O sinal de saída e a respectiva ligação à terra estão disponíveis em fichas RCA, tipo fêmea, no painel frontal.



Figura 3.17 Vários aspectos do *design* do dispositivo tátil.

Depois da montagem de todos os componentes necessários para o dispositivo tátil, procedeu-se à experimentação e verificação dos resultados. As experiências foram realizadas sobre uma placa de metal condutor, como a que se encontra representada na Figura 3.18, que neste caso é uma placa de cobre.

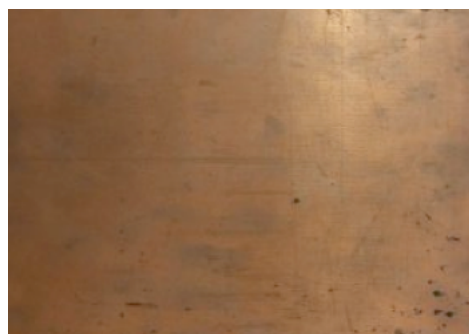


Figura 3.18 Placa de cobre (Cu).

Para que o toque e a percepção das texturas criadas por este dispositivo pudessem ser associadas a imagens reais, utilizou-se também um vidro condutor, ITO (*Indium Tin Oxide*), representado na Figura 3.19.

O ITO é composto por óxido de índio e por óxido de estanho na proporção de 90 % e 10 %, respectivamente. Este composto, quando depositado em camadas finas, é transparente e incolor [27]. A conjugação desta transparência óptica com a condutividade eléctrica fazem deste composto um material perfeito para a utilização que se pretende.

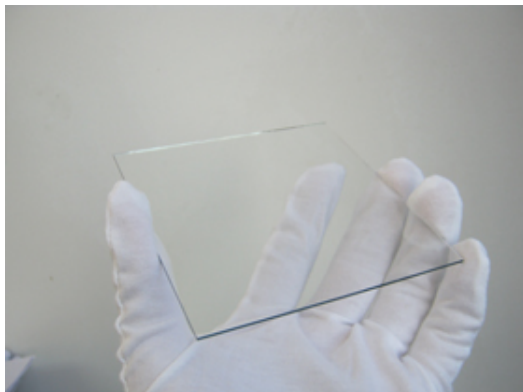


Figura 3.19 Placa de vidro ITO.

Através da utilização do ITO é possível que criar uma interacção virtual acompanhada com a visualização de superfícies e/ou texturas que estejam sob o vidro, como representado na Figura 3.20.

Com a visualização da textura que o dispositivo táctil está a simular a percepção do utilizador torna-se mais realista, isto porque o cérebro associa a sensação táctil à imagem que está a ver sob o vidro criando a ilusão de que está a tocar na superfície.

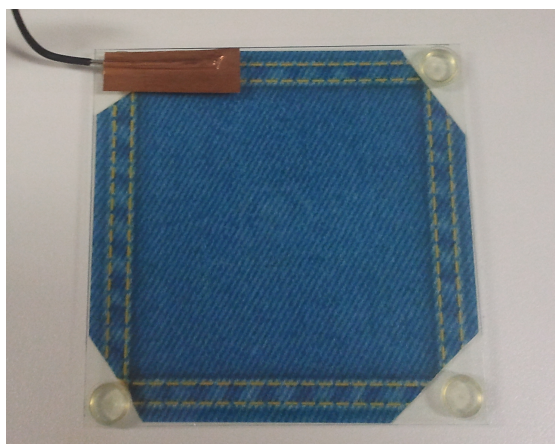


Figura 3.20 Interação virtual através de uma placa de vidro ITO.



### 3.8. Injecção de sinal

Para que o utilizador interaja de forma virtual com um objecto é necessário injectar o sinal no corpo do mesmo. A injeção do sinal pode ser realizada de várias formas, como por exemplo com uma pulseira revestida interiormente em cobre de forma a ficar em contacto com a pele (ver Figura 3.21 à esquerda), ou então, simplesmente tocar com uma mão no dispositivo táctil e com a outra no objecto ou vidro (ITO), como representado na Figura 3.21 à direita. Estas duas formas de injeção do sinal foram as que proporcionaram mais comodidade aos utilizadores, no entanto, há muitas maneiras de fazer essa injeção.

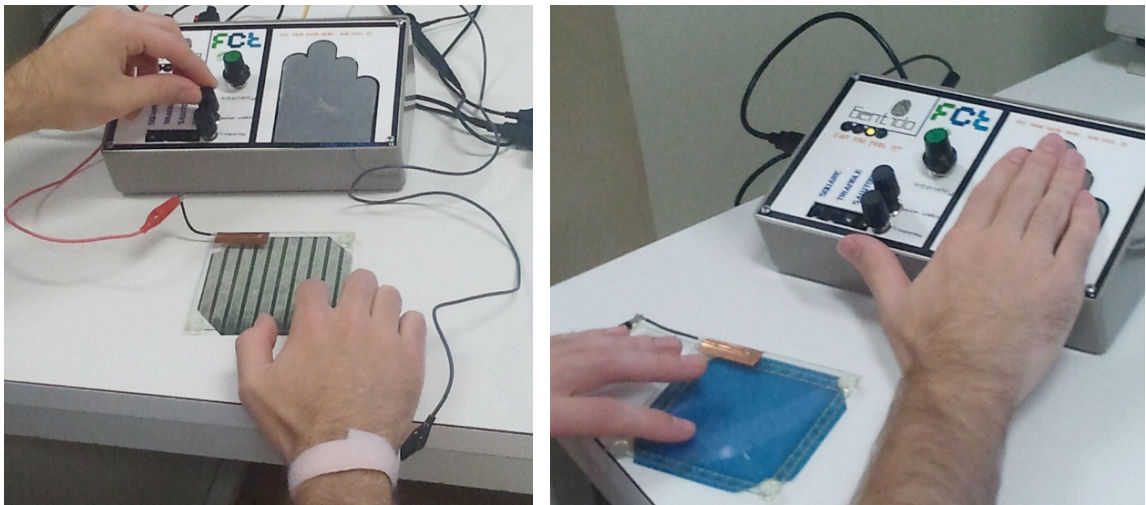


Figura 3.21 Injecção de sinal: através de pulseira (à esquerda) e por contacto directo com o dispositivo (à direita).

Outras formas de injectar o sinal no utilizador seria, por exemplo, através de uma placa condutora que estivesse em contacto com a pele do utilizador em qualquer região do corpo, como num sapato, na parte interior das calças, numa cadeira em que posteriormente o utilizador se sentasse, etc. (ver Figura 3.22). Isto significa que a localização exacta do contacto não é fixa, isto é, o sinal de saída do dispositivo táctil não tem de estar localizado num sítio específico do corpo do utilizador. Assim, há uma grande liberdade quanto ao local onde o sinal de saída do dispositivo táctil pode ser injectado.



Figura 3.22 Injecção do sinal a partir de uma cadeira (à esquerda) e dum sapato (à direita) [1].

### 3.9. A "pele" dos objectos

Para que seja possível a interacção com os objectos é necessário que estes sejam compatíveis. Para isso têm de ser revestidos com um condutor eléctrico. Este é a "pele" dos objectos com que se pretende interagir.

Este dispositivo tátil permite a interacção virtual com todos os objectos, no entanto é necessário que estes sejam condutores metálicos, ou que sejam revestidos por uma película metálica.

Para a adaptação de determinados objectos, como copos, jarras ou até, por exemplo, uma parede de um escritório, é necessário que seja adicionada uma camada condutora, por exemplo, a pintura do objecto com uma tinta condutora, ou com níquel usando técnicas de deposição a vácuo, ou cobrindo-o com camadas condutoras de filmes de ITO (óxido de índio estanho), entre outros.

A constante dielétrica e a espessura do isolador são as principais variáveis de concepção. Para uma dada espessura do isolador, uma constante dielétrica elevada,  $\epsilon_p$ , aumenta a intensidade da sensação tátil (ver Equação 1). Um isolador ideal é um dielétrico com uma permissividade relativa elevada, por exemplo,  $\text{TiO}_2$  com  $\epsilon_p \sim 100$ . Além disso, o acabamento da superfície da "pele" tem de ser suave, de forma a não interferir com o efeito de sensação tátil [1].

As camadas exteriores da pele humana actuam como uma camada de isolamento sem que seja necessário um eléctrodo para o revestimento isolante. No entanto, o suor reduz as propriedades de isolamento da pele e reduz a sensação tátil. Desta forma, quando se pretende interagir com equipamentos com ecrã tátil é necessário que este não seja sensível ao suor e que permita grandes amplitudes de sinal tátil sem atingir a tensão de ruptura da pele, que é de aproximadamente 200 V [1].

### 3.10. Ligação à "Terra"

Para que seja possível interagir com os objectos ou equipamentos com ecrã tátil é necessário que, para além das características de revestimento que os objectos têm de cumprir, também estejam ligados à terra (referência eléctrica). Para que seja possível a interacção tátil, o dispositivo, que está ligado ao utilizador, e o objecto, ou equipamento com ecrã tátil, que está a ser aumentado/analísado com sensações tácteis, têm de estar ligados electricamente a uma referência eléctrica comum, a terra [1] (ver Figura 3.23).



Figura 3.23 Saída da ligação à referência eléctrica do dispositivo tátil.



## 4. Resultados e discussão

Para testar o funcionamento e performance do dispositivo táctil foram efectuadas várias experimentações em trinta indivíduos, nos quais foram testados os quatro tipos de sinais — quadrado, triangular, dente de serra e sinusoidal — proporcionando as diferentes percepções tácteis com a combinação dos parâmetros forma, frequência e amplitude.

Um dos principais desafios na concepção de dispositivos tácteis é assegurar a consistência da sensação táctil através de ambientes e contextos. Um estímulo táctil tem de se sentir da mesma forma e não importa onde o utilizador está localizado, ou o que tenha vestido nesse dia.

A intensidade real dos estímulos tácteis dependerá das impedâncias introduzidas no sistema. A sensação táctil depende de vários factores, como o estado da pele. Neste aspecto o suor é um factor muito importante. Se o utilizador tiver muito suor nas mãos ao interagir com um objecto, não será garantido uma sensação táctil tão eficiente. Quanto maior a área de contacto menor será a resistência e maior será a corrente injectada no utilizador diminuindo a percepção táctil e aumentando a sensação de choque. A pressão de contacto também influencia a sensação táctil uma vez que a resistência diminui com o aumento da pressão e que por conseguinte aumenta a sensação de choque diminuindo a sensação táctil. Por isso, quando o utilizador interagir com um objecto ao fazer a ligação à referência eléctrica, terra, com a palma da mão, e ao fazer a interacção táctil com a ponta do dedo, não deve pressionar fortemente o dedo sobre o objecto ou vidro (ITO) com o qual está a interagir.

A espessura do isolador e as constantes dieléctricas também contribuem para uma maior intensidade sensitiva. Quanto mais grosso for o isolador maior terá que ser a tensão, no entanto, tem de ser inferior à tensão de ruptura do material isolador.

## 4.1. Sensação tátil, forma e amplitude de sinal

A amplitude do sinal tem um efeito imediato sobre a intensidade da percepção da sensação tátil. Com o aumento da amplitude do sinal, mais significativa e evidente é a sensação tátil que o utilizador sente.

Para manter a sensação tátil constante é necessária que seja ajustada a amplitude do sinal em função de todas as impedâncias variadas introduzidas no sistema pelo utilizador. Embora a medição de cada impedância seja individualmente impossível, observa-se que a intensidade de sensações tácteis depende apenas da tensão,  $V_t$ , entre o dedo do utilizador e a camada condutora sobre o objecto. Para contornar este factor por forma a controlar a sensação tátil o dispositivo tem um controlo manual de ganho de tensão.

Ao longo dos primeiros testes realizados a indivíduos verificou-se que, alguns deles, ao interagirem de forma tátil com um objecto ou com o ITO, sentiam uma sensação de choque. Por isso, para garantir a comodidade dos utilizadores, já que os riscos do dispositivo foram minuciosamente tidos em conta e minimizados ao longo do planeamento e desenvolvimento do dispositivo, os testes são iniciados com o ganho de tensão no mínimo. À medida que o utilizador vai respondendo positivamente, o ganho de tensão vai sendo aumentado, através do potenciómetro *intensity*, sempre com consentimento do utilizador e até um valor de ganho de tensão inferior ao valor máximo.

Depois de realizadas algumas experimentações tácteis foi verificado que a forma de onda sinusoidal seria aquela que transmitiria uma textura mais suave aos utilizadores. Tendo em conta os aspectos anteriormente descritos, os testes realizados aos utilizadores foram iniciados com o ganho de tensão no mínimo e com um sinal com a forma sinusoidal.

## 4.2. Sensação tátil e frequência de sinal

Depois de vários testes verificou-se que à medida que a frequência aumenta a intensidade de sensação tátil diminui. Desta forma existe uma relação de proporcionalidade inversa entre estes dois factores. No entanto, alguns dos indivíduos, mesmo começando com o ganho de tensão do dispositivo no mínimo, sentiam uma sensação de choque. Desta forma, foi necessário minimizar esta sensação e ter em conta um outro factor, a frequência. A partir de 700 Hz a sensação tátil é praticamente imperceptível ou, em alguns casos, totalmente imperceptível. Por conseguinte, todos os testes foram iniciados com valores de frequência máximos garantindo o conforto e segurança dos utilizadores. À medida que os valores de frequência diminuem a intensidade sensorial aumenta e à medida que os indivíduos se vão sentindo mais confortáveis com a sensação é possível aumentar a intensidade.

Relativamente aos limites de frequência do sinal, concluiu-se que a percepção tátil é mais intensa para valores entre 5 Hz e 300 Hz. A partir de 300 Hz até 700 Hz a sensação diminui até que deixa de ser totalmente sentida pelo utilizador para qualquer forma de sinal.

### 4.3. Sinal Quadrado

A percepção tátil sentida pelos utilizadores quando é injectado um sinal quadrado é das mais evidentes. Através desta forma de sinal é muito intuitivo o utilizador identificar o tipo de textura que está a sentir. Facilmente é reconhecido um padrão às riscas em que o seu espaçamento depende sobretudo da frequência do sinal e da largura de pulso.

Quando é injectado um sinal quadrado de baixa frequência, cerca de 5 Hz, é possível sentir padrões uniformes às riscas bastante espaçadas, como está exemplificado na Figura 4.1.

Quando é injectado um sinal quadrado com uma frequência mais elevada, cerca de 30 Hz, é possível sentir padrões uniformes às riscas significativamente menos espaçados, como está exemplificado na Figura 4.1.

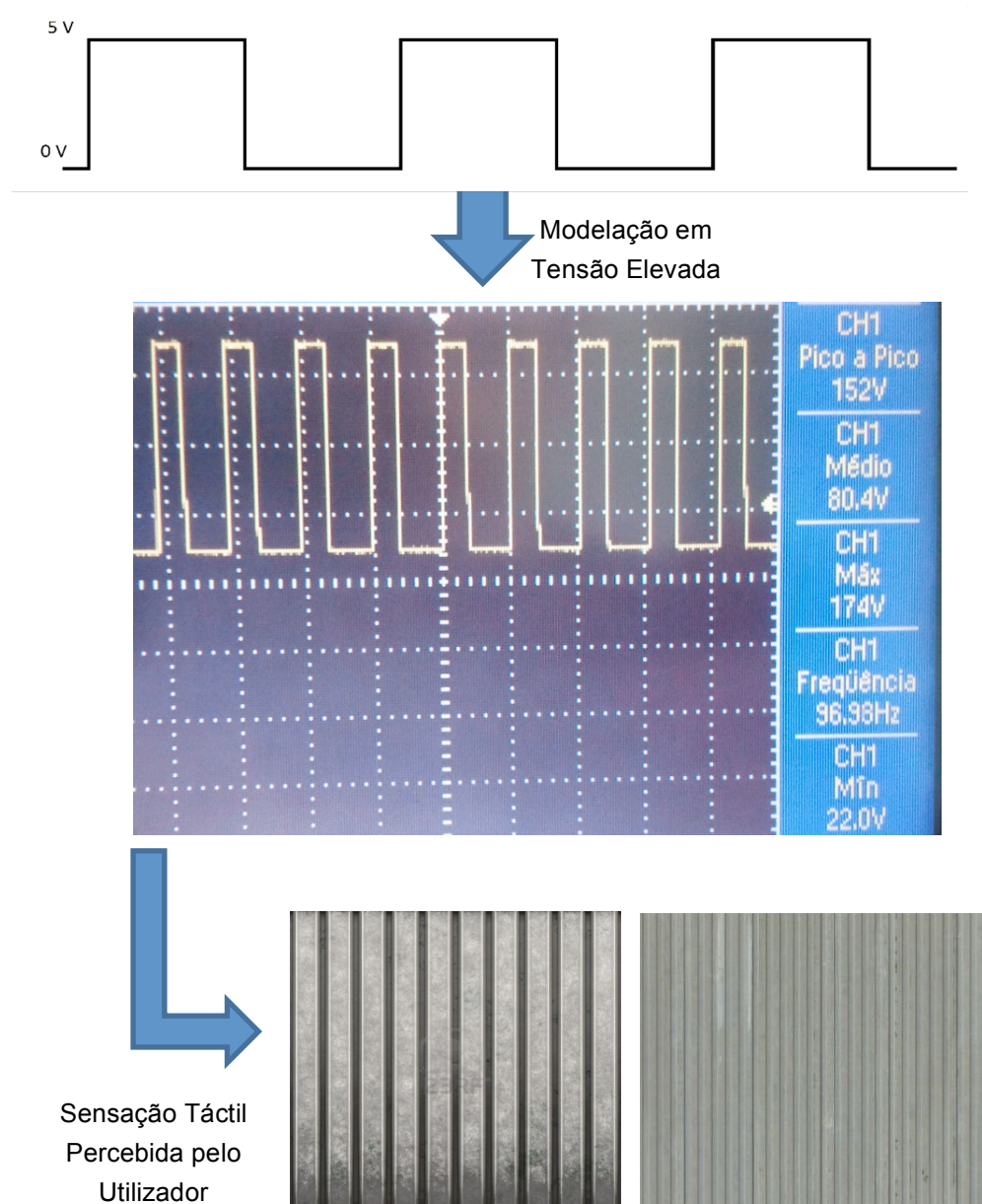


Figura 4.1 Percepção tátil utilizando frequências baixas (esquerda) ou médias (direita).

No sinal de forma quadrada é possível também variar um outro parâmetro, sendo este a largura de pulso, *Pulse Width*, através de um potenciômetro. A variação deste parâmetro é também perceptível aos utilizadores. Quando é injectado um sinal com um PWM baixo é simulada uma textura de padrão às riscas em que a superfície mais saliente é pequena. Ao aumentar o PWM, a saliência torna-se também maior. Na Figura 4.2 está representada a simulação das texturas dos padrões às riscas com a variação do PWM 25 %, 50% e 75 %, respectivamente.

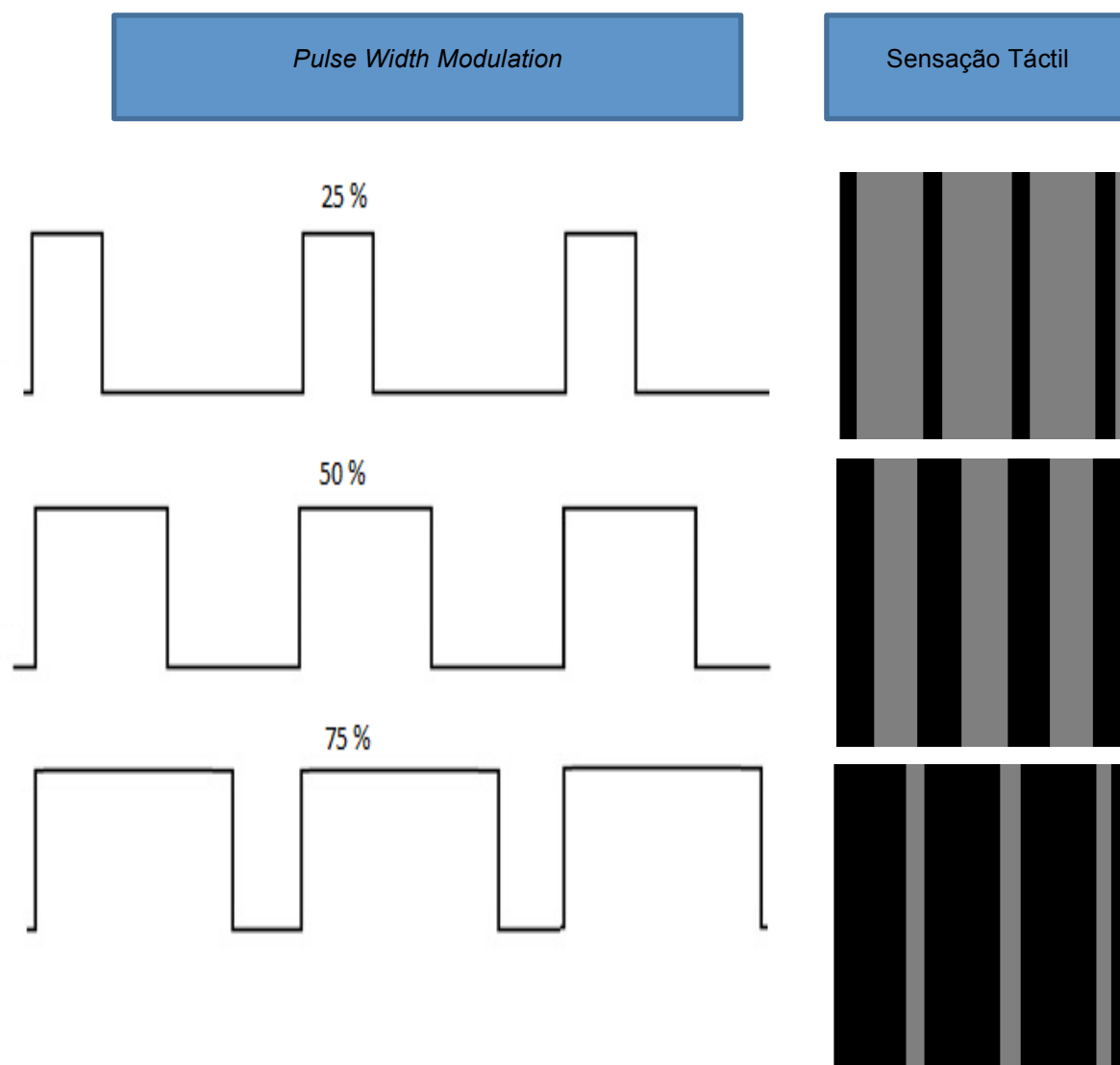


Figura 4.2 Representação simbólica de sensações transmitidas ao utilizador com a variação do PWM do sinal quadrado.

#### 4.4. Sinal Triangular

Através da injeção de um sinal com a forma triangular, o utilizador, ao deslizar o dedo sobre a superfície com a qual pretende interagir, vai sentir uma textura muito mais aguçada do que, por exemplo, quando é injectado um sinal quadrado. A textura simulada através desta

forma de onda apresenta um nível de rugosidade superior às outras formas de sinal e, tendo em conta este facto, através da injeção deste sinal é possível que o utilizador sinta uma superfície rugosa, como por exemplo, a superfície de uma parede (ver Figura 4.3).

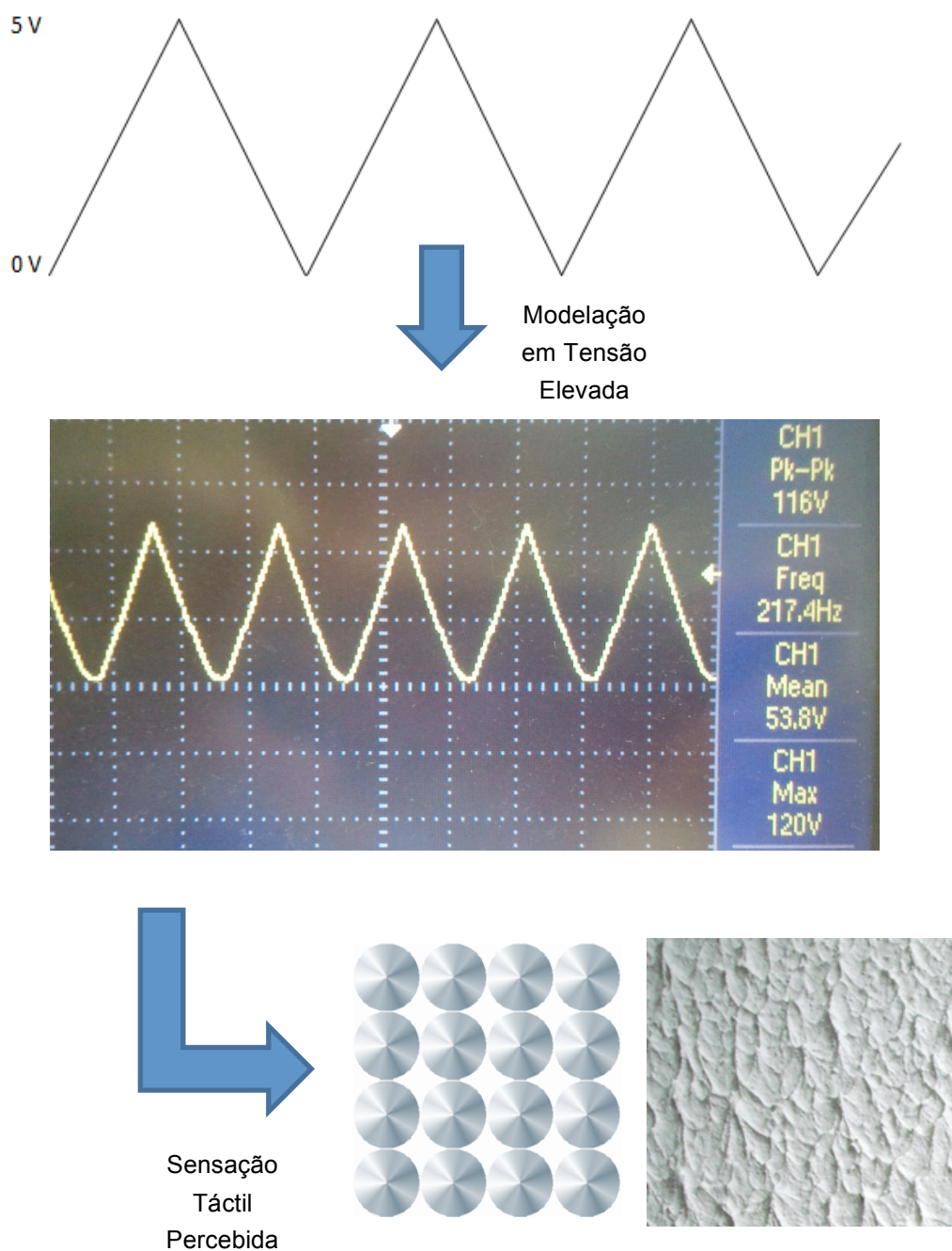


Figura 4.3 Representação simbólica de sensações transmitidas quando é injectado um sinal triangular no utilizador.

#### 4.5. Sinal Dente de Serra

Quando é injectado um sinal dente de serra no utilizador, este, ao interagir com um objecto ou com um vidro (ITO), reconhece um padrão em que a principal característica é a sua



textura fina, aguçada e granulada que se torna cada vez mais pequena consoante o aumento da frequência do sinal.

Através deste tipo de sinal pode ser simulada, por exemplo, uma lixa, permitindo ao utilizador sentir não só a fricção da superfície, mas também os grãos abrasivos ao deslizar o dedo sobre a superfície; e também a textura de calças de ganga.

Quando é injectado um sinal dente de serra com uma frequência de cerca de 300 Hz, é possível sentir padrões muito finos, como está exemplificado na Figura 4.4.

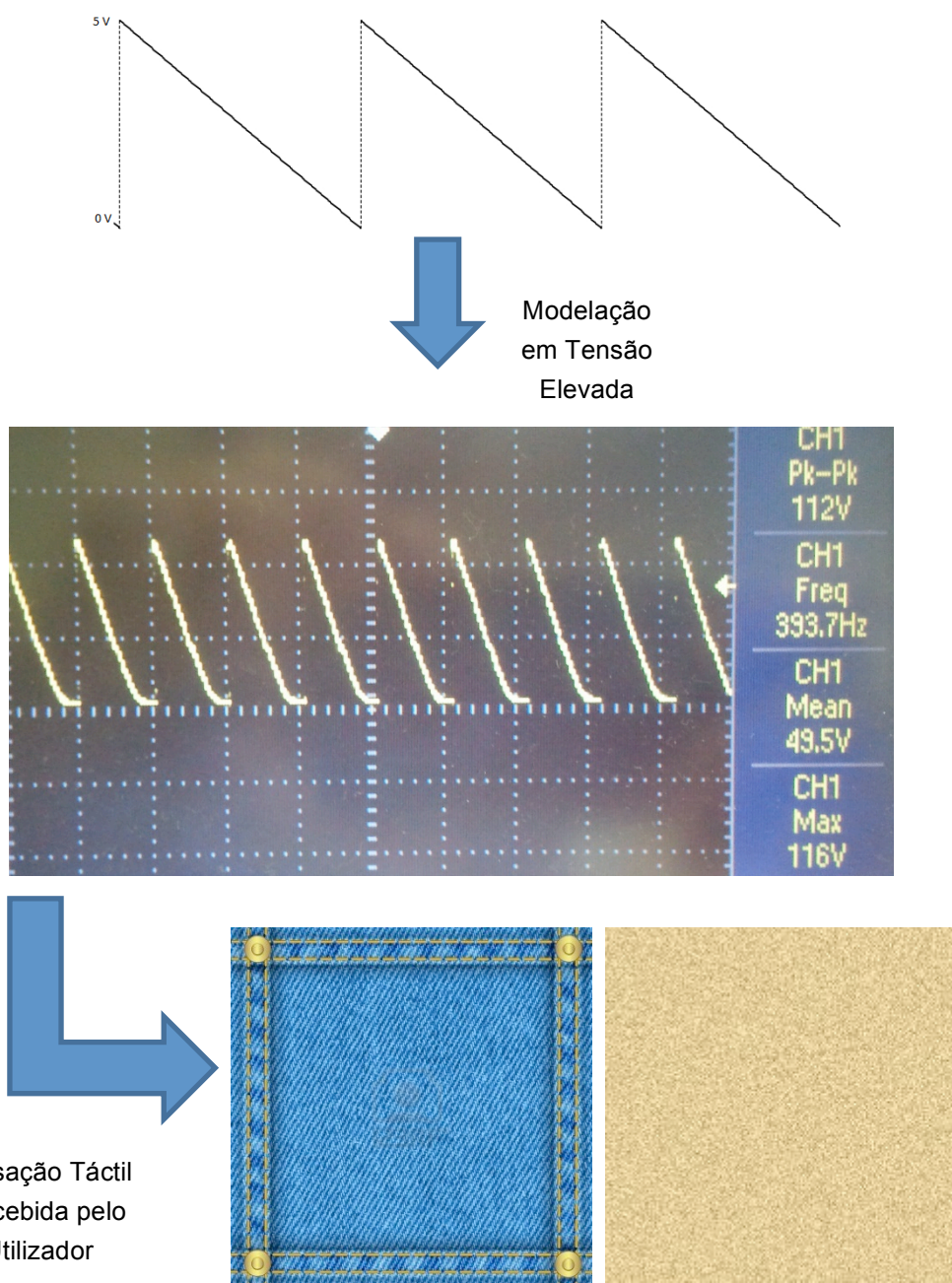


Figura 4.4 Representação simbólica de sensações transmitidas quando é injectado um sinal dente de serra no utilizador.

Quando a frequência do sinal dente serra é elevada, para valores de cerca de 500 Hz, a sensação que o utilizador percebe ao interagir com a superfície é próxima da sensação de deslizar o dedo sobre uma lixa.

#### 4.6. Sinal Sinusoidal

Por último, quando é injectado no utilizador um sinal com a forma de onda sinusoidal, este sente uma textura suave, simulando, por exemplo, a sensação de deslizar o dedo sobre uma superfície ondulada, como a própria forma do sinal sugere (ver Figura 4.5).

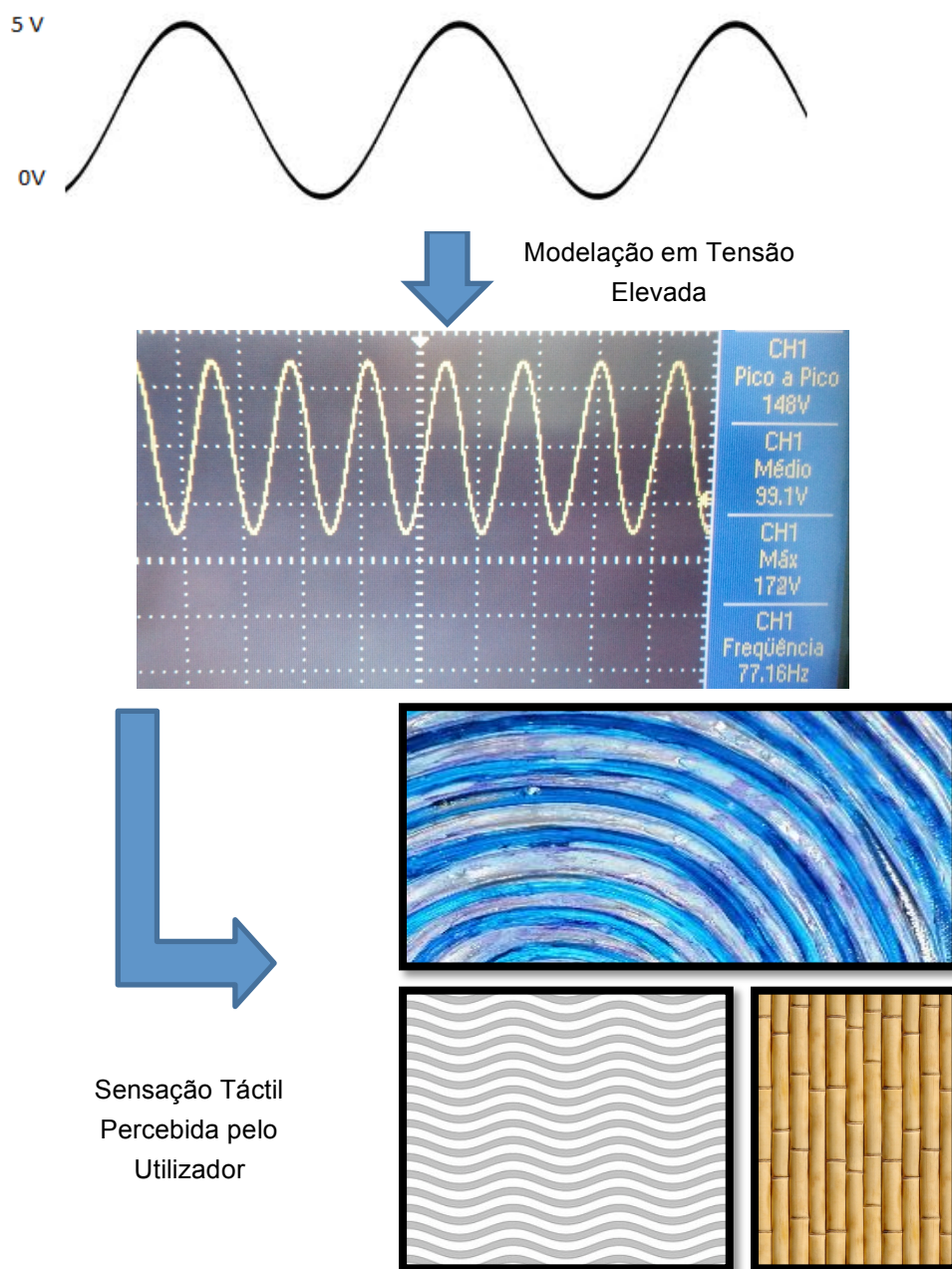


Figura 4.5 Representação simbólica de sensações transmitidas quando é injectada uma onda sinusoidal no utilizador.

Através da variação da frequência do sinal a sensação de ondulação torna-se mais ou menos espaçada, isto é, com um sinal de frequência 10 Hz é possível o utilizador sentir uma superfície ondulada muito mais espaçada do que quando é injectado um sinal de frequência de 50 Hz ou mais. A partir de 300 Hz a sensação de ondulação fica menos evidente devido à proximidade das texturas geradas o que acaba por ser imperceptível ao utilizador devido à resolução inerente ao sentido do tacto.

#### 4.7. Associação visual

A partir dos primeiros testes realizados foi logo possível verificar que a percepção do utilizador poderia ser mais influenciada. Por isso, à sensação táctil foi adicionada a estimulação de um outro sentido, neste caso, a visão. Desde logo se concluiu que a associação visual à sensação táctil melhorava de forma substancial a experiência virtual que os utilizadores usufruíam, tornando-se muito mais evidente e realista devido à ilusão criada. Para isso foram impressas imagens de texturas facilmente associáveis às sensações tácteis simuladas pelo dispositivo e colocadas debaixo do vidro (ITO), como representado na Figura 4.6.

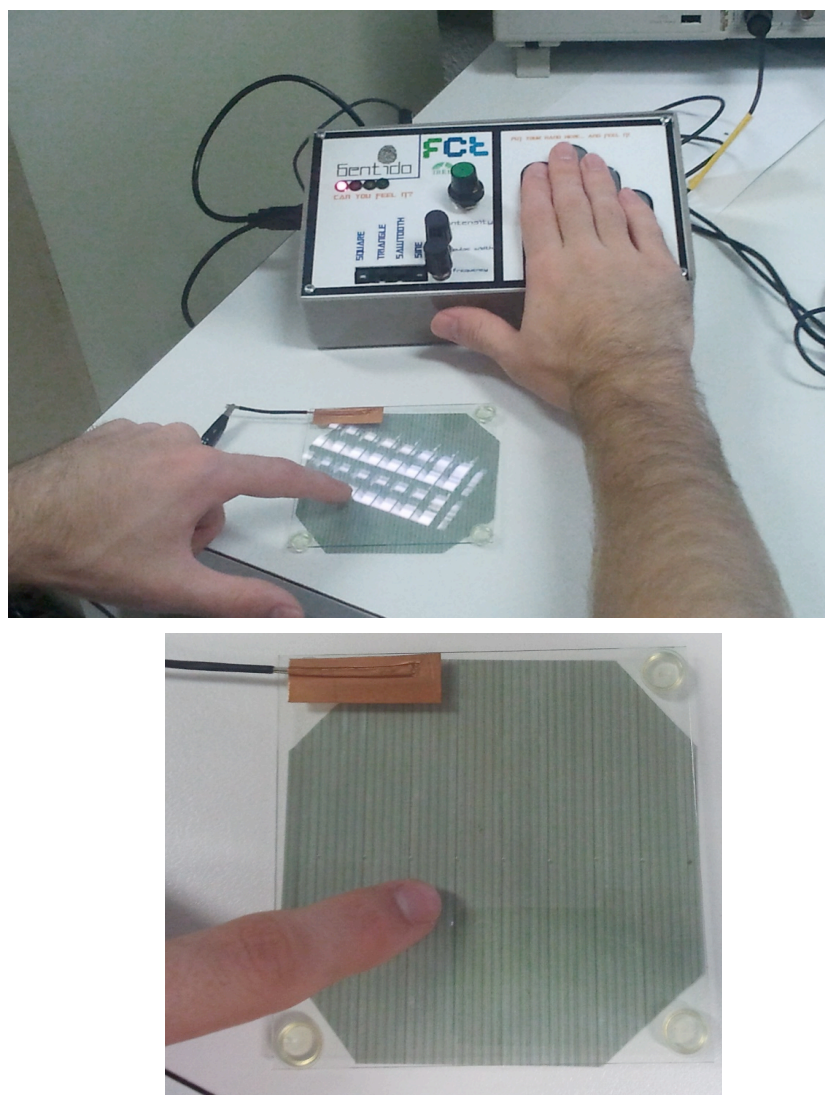


Figura 4.6 Associação visual entre a imagem de uma textura e a sensação táctil produzida pelo dispositivo.



## 4.8. Electro vibração

Com o objectivo de confirmar a geração de electrovibrações pelo dispositivo, foi utilizada uma placa de cobre ligeiramente abaulada, apoiada apenas sobre duas das suas arestas, permitindo assim que flectisse sobre a pressão do dedo do utilizador.

Quando o utilizador desliza o dedo sobre a placa são geradas vibrações na placa de cobre com intensidade suficiente para produzir ondas sonoras audíveis.

Utilizando a aplicação informática *gStrings* num *smartphone* Samsung Galaxy Fit com o sistema operativo Android foi possível verificar que, como era esperado, a frequência fundamental da onda sonora produzida é igual à frequência do sinal injectado no utilizador. Verificou-se ainda que diferentes formas do sinal produzem ondas com diferentes sonoridades.

## 4.9. Testes de percepção táctil

Com o objectivo de quantificar a eficiência do dispositivo na geração de sensações tácteis foi planeada uma experiência em que os utilizadores, numa primeira fase, foram ensinados a reconhecer quatro texturas, com associação visual, cujas características estão indicadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Texturas simuladas usadas nos testes de percepção.

Textura	Forma do sinal	Frequência (Hz)
Riscas finas	Quadrado	20
Riscas grossas	Quadrado	5
Ganga (tecido)	Dente de Serra	300
Superfície rugosa	Triangular	50

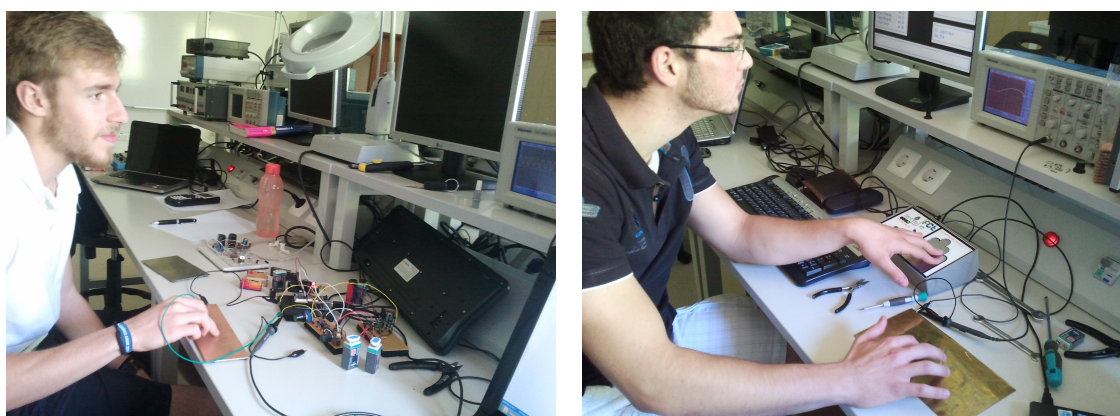


Figura 4.7 Execução experimental de testes de percepção táctil.

Para cada utilizador o operador do dispositivo escolheu uma sequência aleatória de oito sensações tácteis com as texturas indicadas na Tabela 4.1. Confrontados apenas com as

sensações tácteis, sem associação visual, os utilizadores foram desafiados a identificar a textura correspondente. A amplitude dos sinais foi ajustada individualmente a cada utilizador para que as sensações tácteis pudessem ser reconhecidas sem que existisse sensação desagradável (choque) provocada por excesso de corrente (ver Figura 4.7).

Verificou-se que os utilizadores identificaram com alguma rapidez as texturas a que foram sujeitos. Os resultados dos testes podem ser observados na Tabela 4.2, onde se pode verificar que, em média, os utilizadores identificaram com sucesso 7.2 das 8 texturas a que foram sujeitos com a seguinte ordem: (1) Ganga; (2) Riscas grossas; (3) Superfície rugosa; (4) Superfície rugosa; (5) Riscas finas; (6) Riscas grossas; (7) Ganga; (8) Riscas grossas.

Tabela 4.2 Resultados do teste de percepção táctil efectuado a seis indivíduos.

<b>Indivíduo</b>	<b>Respostas certas (em oito)</b>
<b>#1</b>	8
<b>#2</b>	7
<b>#3</b>	7
<b>#4</b>	6
<b>#5</b>	7
<b>#6</b>	8
<b>Média</b>	7.167

Um resultado de cerca de 90% de identificações correctas das sensações tácteis é um bom indicador do bom funcionamento do dispositivo enquanto gerador de sensações tácteis.

## 5. Conclusões e perspectivas

Com a tecnologia desenvolvida neste trabalho a sensação tátil é conseguida através da injeção de uma corrente eléctrica no corpo do utilizador. Quanto este interage com objectos ou uma superfície aterrada (referência eléctrica comum), como por exemplo uma placa de vidro de ITO, a corrente provoca a electrovibração, cujo efeito se traduz numa sensação tátil. A tecnologia resultante é leve, barata e pode ser usada tanto para interagir com objectos reais como com virtuais.

Para que o utilizador consiga perceber a sensação tátil deve deslizar os dedos sobre a superfície do objecto em questão, não sendo possível criar esta sensação se os mesmos estiverem estáticos.

Embora não seja necessária instrumentação activa do meio ambiente com actuadores tácteis, é necessária alguma instrumentação passiva de objectos e superfícies para torná-los compatíveis com a tecnologia, bem como o estabelecimento de estratégias de ligação a uma referência eléctrica comum (terra). Embora sejam necessários alguns pré-requisitos comparativamente com outros dispositivos desenvolvidos até à data, este dispositivo consegue ser menos pesado e menos dispendioso do que a maioria dos outros dispositivos. A sua manutenção também deverá ser praticamente desnecessária.

Os resultados obtidos durante os testes em utilizadores foram sempre bastantes satisfatórios, tanto na óptica dos utilizadores, que demonstraram grande deslumbre ao poderem presenciar e experimentar esta tecnologia, como na óptica dos elementos directamente envolvidos na execução da mesma.

A variedade de sensações tácteis que podem ser obtidas através deste dispositivo é muito grande. Através dele é possível simular texturas com variados tipos de padrões, como por exemplo, padrões às riscas, ondulados, com picos, etc. Esta variedade é obtida através da conjugação dos parâmetros do sinal injectado no utilizador, sendo estes a forma, a frequência, a largura de pulso (PWM), no caso na onda quadrada, e a amplitude, que possibilitam uma

vasta gama de sensações. A título exemplificativo através deste dispositivo é possível simular a textura de umas calças de ganga, de borrachas, de areia, etc.

Com este dispositivo foi também possível verificar a existência do efeito da electrovibração, produzindo ondas sonoras claramente audíveis quando o utilizador desliza o dedo por uma chapa de cobre suportada de forma a poder vibrar.

Os resultados obtidos com este dispositivo tátil foram bastante satisfatórios, sendo no entanto fácil fazer melhorias que o tornarão mais eficiente e funcional. O espaço que cada circuito electrónico ocupa poderá ser substancialmente minimizado e dessa forma tornar o dispositivo mais pequeno. A questão da portabilidade também será bastante importante, e apesar de ter sido um factor com pouca relevância nesta primeira fase de desenvolvimento, é um aspecto de fácil resolução. O controlo manual do dispositivo, composto pelos interruptores e potenciómetros, também poderá ser substituído, dependendo de qual fosse a aplicação final para o mesmo, por um controlo automático. Um outro aspecto que também poderá ser melhorado é a criação dum circuito de ajuste automático da corrente injectada no utilizador em função da sua impedância. O *design* utilizado poderá sofrer algumas alterações por forma a torná-lo mais apelativo.

São muitas as aplicações possíveis para um dispositivo como o que foi desenvolvido neste trabalho, para a área comercial, de entretenimento, nomeadamente em jogos, mas também na área da saúde, a nível académico ou até na cultura.

A nível cultural, por exemplo, em muitas galerias de arte não é permitido que as pessoas toquem nos quadros ou esculturas. Através deste dispositivo, adaptando-o convenientemente, seria possível “sentir” os objectos através de um vidro, sem que fosse necessário tocar nos mesmos (ver Figura 5.1). Este dispositivo poderia ser também enquadrado em arte realista e incluir texturas apropriadas para os quadros, ou até na arte impressionista, incluindo texturas que têm alguma relação com o tema pretendido, ou ainda na arte revolucionária e neste estilo seriam incluídas texturas extremamente discordantes de acordo com a visão do artista. Este dispositivo, com algumas adaptações, poderia melhorar a fruição da arte, introduzindo um novo conceito de arte participativa.

A *Internet* é cada vez mais um meio indispensável para a sociedade e através dela é possível realizar inúmeras operações. As pessoas recorrem cada vez mais à *Internet* para efectuarem compras, e com este dispositivo seria possível abrir um novo mundo. Através dos monitores dos computadores seria possível, não só ver, neste caso, o que querem comprar, mas também sentir a textura, por exemplo, de uma peça de roupa, o que facilitaria e até poderia influenciar a decisão de compra.

Através do dispositivo desenvolvido seria também possível, através de uma adaptação, inseri-lo em ambientes clínicos ou académicos, como por exemplo numa mesa de autópsia virtual, possibilitando que o aluno ou o médico sintam e diferenciem texturas, permitindo, por exemplo, diferenciar uma incisão num osso ou num tecido mole.



Figura 5.1 Sensação táctil sem necessidade de contacto com os objectos expostos [1].

Uma outra aplicação para este dispositivo seria para pessoas com insuficiência visual, e através dele seria possível por exemplo (ver Figura 5.2) fornecer orientações personalizadas em paredes.

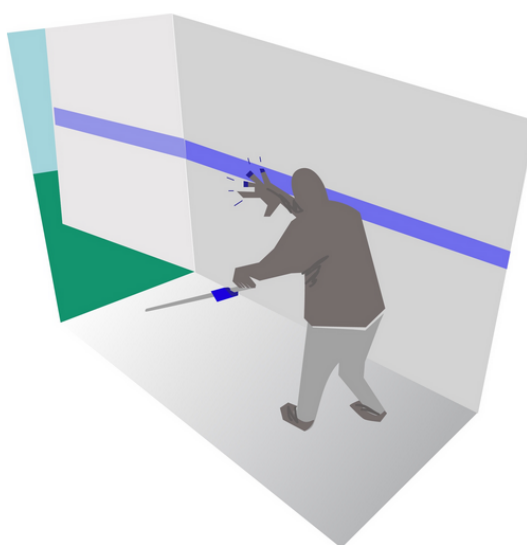


Figura 5.2 Orientações personalizadas em paredes para insuficientes visuais [28].

Com este dispositivo seria também possível interagir com imagens projectadas na parede, como representado na Figura 5.3, para isso teriam de ser feitas algumas adaptações e ligações a computadores e equipamentos como o *Microsoft Kinect*, de modo a interagir de uma forma mais real e sentir de uma forma como até aqui não foi possível o objecto que está a ser projectado na mesma [1].

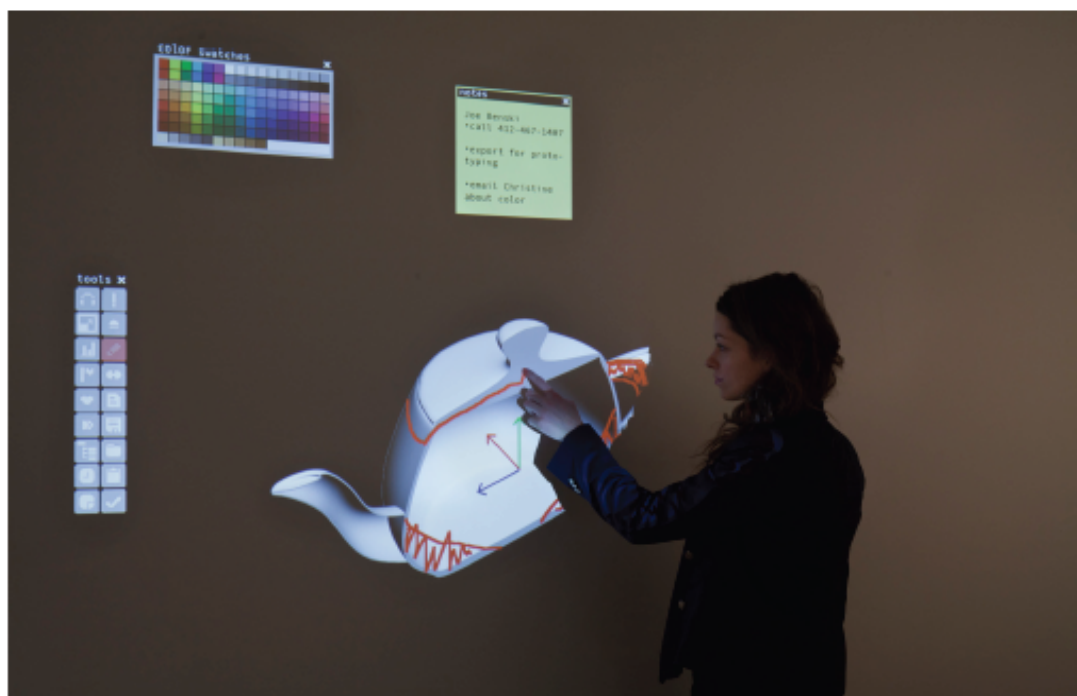
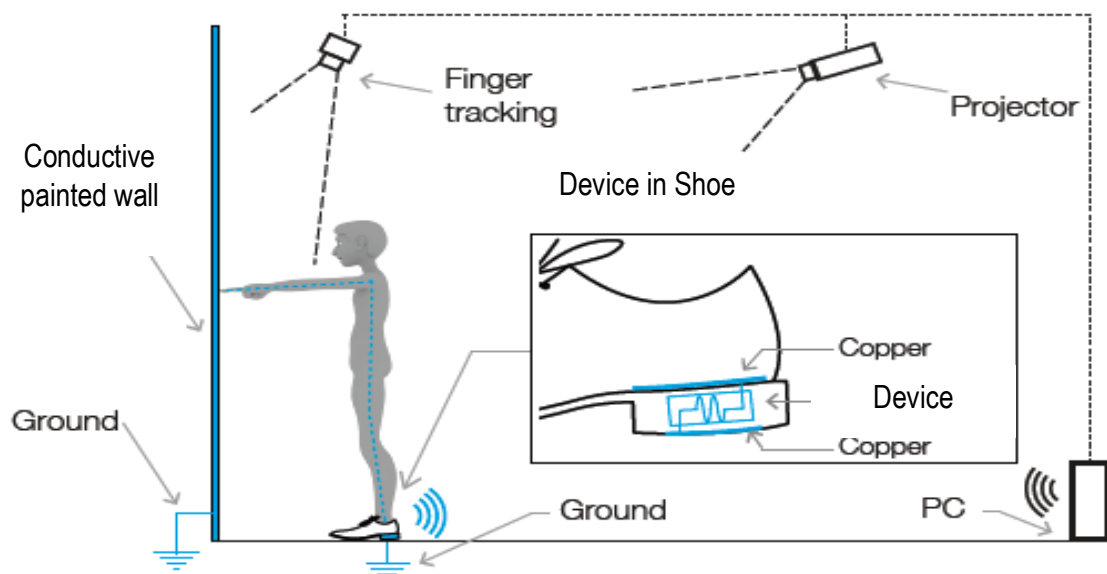


Figura 5.3 Interação tátil numa parede [1].

Não se esgota aqui a lista de aplicações que os dispositivos de resposta tátil poderão ter no nosso dia-a-dia. As sensações tácteis produzidas pelo dispositivo desenvolvido neste trabalho é apenas um vislumbre das potencialidades destas novas tecnologias que, num futuro não muito longínquo, se espera que sejam comuns no nosso quotidiano.

## *Bibliografia*

---

1. Bau, O., Poupyrev, I. (2012) "Revel." ACM Transactions on Graphics 31(4): 1-11.
2. Benali-Khoudja, M., Hafez, M., Axexandre, J., Kheddar, A. (2004) "Tactile interfaces: a state-of-the-art survey" in ISR, Paris France.
3. Youngblut, C., Johnston, R.E., Nash, S.H., Wienclaw, R.A., Will, C.A. (1996) "Review of Virtual Environment Interface Technology", Institute for Defense Analyses (IDA) 1801 N. Beauregard St. Alexandria, VA 22311-1772, IDA Paper P-3186, DISTRIBUTION CODE 2A, July 1996.
4. Anderson, T., Breckenridge, A., Davidson, G. (1999) "FGB: A Graphical and Haptic User Interface For Creating Graphical", Haptic User Interfaces, Sandia National Laboratories.
5. Petriu, E.M., McMath, W.S. (1992) "Tactile Operator Interface for Semi- Autonomous Robotic Applications", AIRAS, Artificial Intelligence, Robotics and Automation, Space, pp. 77-82, Toulouse France, September.
6. Netto, A.V., Machado, L.S., Oliveira, M.C.F. (2002) "Realidade Virtual: Definições, Dispositivos e Aplicações". Tutorial. Revista Eletrônica de Iniciação Científica da SBC. Março de 2002. Ano II, v.II, n.2, ISSN 1519-8219.
7. Bianchi, G., Knoerlein, B., Szekely, M., Harders, M. (2006) "High precision augmented reality haptics". In Proc. Of EuroHaptics'06, 169-178.
8. Chouvardas, V., Miliou, A.N., Hatalis, M. "Tactile display applications: A state of the art survey", 2nd Balkan Conference in Informatics, November 17-19, 2005, Ohrid, FYROM.
9. Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F., Kawamura, R. (2001) "Project FEELEX: adding haptic surface to graphics". In Proc. Of SIGGRAPH'01, ACM, 469-476.
10. Kwon, D., Kim, S. (March 2008) "Haptic Interfaces for Mobile Devices- A Survey of the State of the Art", Telerobotics and Control Laboratory, KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Korea.
11. (Tactus Technology web site) <http://www.tactustechnology.com/>, acedido a 20 de Fevereiro de 2013.
12. Niwa, M., Nozaki, T., Maeda, T., Ando, H. (2010) "Fingernail-Mounted Display of Attraction Force and Texture". In Proc. Of EuroHaptics'10, Springer-Verlag, 3-8.
13. (Senseg web site) <http://senseg.com/>, acedido a 02 de Agosto de 2013.
14. (New Scientist site) <http://www.newscientist.com/article/dn19510-nokia-touchscreen-creates-texture-illusion.html#.Ujpp1safhzp>, acedido a 18 de Setembro de 2013.

15. Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., Harrison, C. (2010) "TeslaTouch: Electro vibration for Touch Surfaces". In ACM UIST 2010: ACM. pp. 283-292.
16. Kaczmarek, K., Webster, J., Pach-y-Rita, P., Tompkins W. (1991) "Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems". IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 38(1): pp. 1-16.
17. Poupyrev, I., S. Maruyama. (2003) "Tactile interfaces for small touch screens". In proceeding of: Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Vancouver, Canada, November 2-5, 2003.
18. <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAMM8AB/seguranca-eletricidade>, acessado a 20 de Janeiro de 2013
19. S. Lourenço, T. Silva, S. Filho, (2007) "Um estudo sobre os Efeitos da Electricidade no Corpo Humano sob a Égide da Saúde e Segurança no Trabalho". Exacta, São Paulo, v.5, n.1, p. 135-43.
20. (Arduino web site) <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno> acessado a 20 de Agosto de 2013.
21. Atmel Datasheet: 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash, ATmega48PA, ATmega88PA, ATmega168PA, ATmega328P, Rev. 8161D-AVR-10/09
22. <http://techmind.dk/arduino-singleboard/arduino-atmega328-pinout/> acessado a 20 de Agosto de 2013.
23. PINTO, Marcos de Castro. Aplicação de arquitectura pedagógica em curso de robótica educacional com *hardware* livre. 2011. 158 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Instituto de Matemática, Núcleo de Computação Electrónica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
24. <http://www.instructables.com/id/Arduino-Waveform-Generator/>, acessado a 9 de Setembro de 2013.
25. Maxim Integrated Products. Datasheet: MAX770- MAX773 "5V/12V/15V or Adjustable, High-Efficiency, Low IQ, Step-Up DC-DC Controllers", 1996
26. Horowitz, P. & Hill, W. "The Art of Electronics". Cambridge University Press, 1990.
27. (ITO website) <http://www.indium.com/inorganic-compounds/indium-compounds/indium-tin-oxide/>, acessado a 9 de Setembro de 2013.
28. <http://www.olivierbau.com/revel.php>, acessado a 19 de Setembro